

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра систем искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г. М. Цибульский
« _____ » _____ 2016 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Интеллектуальное управление скоростью движения асфальтоукладчика
09.04.02 – Информационные системы и технологии
09.04.02.02 – Информационные системы и технологии в управлении
технологическими процессами

Научный руководитель	_____	проф., д-р техн. наук В. И. Иванчура
	подпись, дата	
Выпускник	_____	Н. Н. Зуйкова
	подпись, дата	
Рецензент	_____	доцент, канд. техн. наук А. П. Прокопьев
	подпись, дата	
Нормоконтролер	_____	М. А. Аникьева
	подпись, дата	

Красноярск 2016

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра систем искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г. М. Цибульский
« ____ » _____ 2016 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студентке Зуйковой Наталье Николаевне

Группа КИ 14-05-1М

Направление (специальность) 09.04.02 Информационные системы и технологии

Тема выпускной квалификационной работы: Интеллектуальное управление скоростью движения асфальтоукладчика

Утверждена приказом по университету № 4720/С от 31.03.2015

Руководитель ВКР В. И. Иванчура, профессор, д-р техн. наук, каф. СААУП, ИКИТ.

Исходные данные для ВКР:

Технология процесса асфальтоукладки, описание гидравлической трансмиссией асфальтоукладчика. Автоматическая система управления скоростью асфальтоукладчика. Гидравлическая система привода хода асфальтоукладчика. Искусственный интеллект. Нечеткая логика. Нечеткий регулятор.

Перечень разделов ВКР:

- 1) искусственный интеллект;
- 2) объект исследования;
- 3) разработка системы управления скоростью движения асфальтоукладчика;
- 4) синтез аналогового, цифрового и нечеткого регулятора;
- 5) разработка имитационной схемы управления скоростью;
- 6) компьютерное имитационное моделирование в среде Matlab&Simulink.

Перечень графического материала:

Рисунок 1 – Структура блока нечеткого вывода;

Рисунок 2 – Диаграмма процесса нечеткого вывода в нечетких САУ;

Рисунок 3 – Технологическая схема асфальтоукладчика;

Рисунок 4 – Гидравлическая схема привода ведущих колес;

Рисунок 5 – Структурная схема аналогового ПИД-регулятора;

Рисунок 6 – Структурная схема цифрового ПИД-регулятора;

Рисунок 7 – Имитационная модель нечеткого ПИД-регулятора

Рисунок 8 – Лингвистические правила для нечеткого регулятора;

Рисунок 9 – Модель системы управления скоростью движения асфальтоукладчика.

Руководитель ВКР

подпись

В. И. Иванчура

Задание принял к исполнению

подпись

Н. Н. Зуйкова

« ____ » _____ 2016 г.

График выполнения выпускной квалификационной работы

Студентки Зуйковой Натальи Николаевны

По специальности 09.04.02 Информационные системы и технологии

На тему: Интеллектуальное управление скоростью движения асфальтоукладчика

Научный руководитель проф. д-р техн. наук Иванчура Владимир Иванович
каф. СААУП, ИКИТ.

Таблица 1 - Этапы выполнения ВКР

Виды выполняемых работ	Сроки выполнения
Выбор темы. Первоначальное название темы	Сентябрь 2014
Предоставление на кафедру заявления на выбор темы ВКР и научного руководителя	Октябрь 2014
Составление совместно с научным руководителем графика работы над ВКР, задания и плана работы	Октябрь 2014
Представление теоретических глав работы научному руководителю	Июнь 2015
Представление первого варианта работы научному руководителю	Ноябрь 2015
Прохождение преддипломной практики и представление материалов научному руководителю	с 25.01.2016 по 29.05.2016
Работа над окончательным текстом магистерской диссертации и представление его научному руководителю	Июнь 2016
Работа над графическими иллюстрациями к магистерской диссертации, над докладом по работе, презентация работы	Июнь 2016
Представление магистерской диссертации на кафедру для предзащиты	09.06.2016
Защита магистерской диссертации	24.06.2016

С графиком выполнения магистерской диссертации ознакомлены.

Подпись студентки

Н. Н. Зуйкова

Подпись научного руководителя

В. И. Иванчура

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Интеллектуальное управление скоростью движения асфальтоукладчика» содержит 81 страницу текстового документа, 31 иллюстрацию, 34 формулы, 5 приложений, 20 источников.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ПРИВОД ХОДА АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКА, ПИД РЕГУЛЯТОР В СИСТЕМАХ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА, НЕЧЕТКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ.

Объектом разработки является процесс регулирования скорости движения колесного асфальтоукладчика.

Цель работы — Разработка системы автоматического управления скоростью движения колесного асфальтоукладчика.

В процессе работы в среде Mathcad был произведён расчёт параметров функционально необходимых элементов гидропривода.

В результате работы в среде MATLAB с помощью пакетов расширений Simulink (SimHydraulics, SimMechanics) и FuzzyLogicToolbox реализована модель процесса управления скоростью движения асфальтоукладчика.

Основные показатели разработанной математической модели: адекватность воспроизведения процессов, связанных с работой системы и моделирование результатов, обеспечение астатизма по изменению нагрузки двигателя, требуемое время переходного процесса.

Степень завершённости работы: имитационная модель процесса управления скоростью асфальтоукладчика готова к использованию в дальнейших разработках по данной тематике.

Эффективность полученных результатов определяется работоспособностью моделей, разработанных в среде Simulink и результатами отработки задающих воздействий.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Искусственный интеллект	10
1.1 Методы искусственного интеллекта	10
1.2 Нечеткая логика. Системы нечеткого вывода	11
1.3 Нечеткая логика в системах автоматического управления	23
2 Объект исследования	26
2.1 Устройство асфальтоукладчика.....	26
2.2 Гидравлический привод асфальтоукладчика.....	27
3 Разработка системы управления скоростью движения асфальтоукладчика ...	29
3.1 Математическая модель объекта управления в терминах пространства переменных состояния.....	30
3.2 Решение задачи с использованием передаточных функций	33
4 Синтез аналогового, цифрового и нечеткого ПИД-регулятора.....	35
4.1 Синтез аналогового ПИД-регулятора	35
4.2 Синтез цифрового ПИД-регулятора.....	40
4.3 Синтез нечеткого ПИД-регулятора	42
5 Разработка имитационной схемы управления скоростью	46
5.1 Разработка модели гидравлической трансмиссии	46
5.2 Разработка имитационной модели аналогового регулятора	47
5.3 Разработка имитационной модели цифрового регулятора.....	48
5.4 Разработка имитационной модели нечеткого регулятора	49
6 Компьютерное имитационное моделирование в среде Matlab&Simulink	51
Заключение	54
Список использованных источников.....	56
Приложение А Расчеты	59
Приложение Б Имитационная модель объекта управления	60

Приложение В Публикации.....	61
Приложение Г Свидетельство о государственной регистрации программы	70
Приложение Д Презентация	71

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильная дорога – объект транспортной инфраструктуры, предназначенный для движения транспортных средств и включающий в себя земельные участки в границах полосы отвода автомобильной дороги и расположенные на них или под ними конструктивные элементы (дорожное полотно, дорожное покрытие и подобные элементы) и дорожные сооружения, являющиеся ее технологической частью, защитные дорожные сооружения, искусственные дорожные сооружения, производственные объекты, элементы обустройства автомобильных дорог.

Строительство автомобильной дороги состоит из технологических процессов, выполняемых в определенной последовательности и требующих больших затрат материальных и трудовых ресурсов. Снижение этих затрат может быть достигнуто широким внедрением комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

Значительные перемены произошли в технологии строительства дорог с асфальтобетонными покрытиями. Новые асфальтоукладчики позволяют обеспечивать более высокую степень предварительного уплотнения асфальтобетонных смесей. Это не только снижает затраты на их дальнейшее уплотнение, но и улучшает качество покрытия. Асфальтоукладчики оснащены автоматическими системами обеспечения продольного и поперечного профиля и блокировки привода хода и рабочих органов.

В промышленности в области адаптивного и оптимального управления существует множество разработок. При этом в большинстве случаев регулирование технологическими процессами осуществляется с помощью ПИД-регуляторов. Отметим, что теория управления в классическом и современном понимании в большой степени основана на идеи линеаризации систем. Идея предполагает наличие точной математической модели управляемого процесса. Однако, если положить объект линейным, то математическое моделирование не всегда будет отражать действительные физические свойства объекта.

В начале автоматизации производства учет нелинейных свойств объекта управления не был критичным. Значительный экономический эффект достигался путем внедрения ПИД-регуляторов и микропроцессорной техники.

На сегодняшний день при необходимости модернизировать систему управления (СУ) производится замена контроллеров на более мощные. Отсутствие изменений в закон ПИД-управления не приносит желаемого эффекта модернизации. Также известно, что изменяя задание для контура управления, необходимо перенастроить коэффициенты ПИД-регулятора под новый режим работы. Процедура перенастройки коэффициентов в большинстве случаев не выполняется на производстве.

В связи с этим в магистерской диссертации рассматривается возможность модернизации системы управления существующего контура с ПИД-регулятором таким образом, чтобы система имела алгоритм подстройки параметров регулятора в реальном масштабе времени.

Для разработки алгоритма применяются методы искусственного интеллекта, а именно – нечеткая логика. С помощью данного метода возможно справиться с присутствующими шумами и помехами, которые представляют сложность для моделирования динамическими элементами.

Целью данной работы является применение нечеткой логики в управлении скоростью асфальтоукладчика.

Основные задачи для достижения цели работы:

- анализ рабочего процесса асфальтоукладчика;
- анализ научных публикаций по теме нечеткой логики;
- составление структурной схемы автоматизации процесса управления скоростью движения;
- синтез цифрового ПИД-регулятора и приведение его к нечеткой форме;
- формирование имитационной модели процесса управления в среде MATLAB&Simulink;
- анализ результатов моделирования с цифровым и нечетким регулятором.

1 Искусственный интеллект

1.1 Методы искусственного интеллекта

Искусственный интеллект (ИИ) — научное направление, разрабатывающие методы, позволяющие решать интеллектуальные задачи, решаемые человеком.

Можно выделить две научные школы с разными подходами к проблеме ИИ: конвенционный ИИ и вычислительный ИИ.

В конвенционном ИИ главным образом используются методы машинного самообучения, основанные на формализме и статистическом анализе. Вычислительный ИИ подразумевает итеративную разработку и обучение. Обучение основано на эмпирических данных и ассоциируется с несимвольным ИИ и нечеткими системами.

Методы конвенционного ИИ реализуются в следующих подходах и системах.

- Экспертные системы: программы, которые, действуя по определенным правилам, обрабатывают большое количество информации, и в результате выдают заключение или рекомендацию на ее основе.
- Рассуждение по аналогии (Case-based reasoning).
- Байесовские сети доверия: вероятностные модели, представляющие собой систему из множества переменных и их вероятностных зависимостей.
- Поведенческий подход: модульный метод построения систем ИИ, при котором система разбивается на несколько сравнительно автономных программ поведения, которые запускаются в зависимости от изменений внешней среды.

Основные методы вычислительного ИИ.

- Нейронные сети: коннекционистские модели нервной системы, демонстрирующие, в частности, высокие способности к распознаванию образов.
- Нечеткие системы: методики для рассуждения в условиях неопределенности.

- Эволюционные вычисления: модели, использующие понятие естественного отбора, обеспечивающего отсеивание наименее оптимальных согласно заданному критерию решений. В этой группе методов выделяют генетические алгоритмы и т.н. муравьиный алгоритм.

1.2 Нечеткая логика. Системы нечеткого вывода

Нечеткая логика – раздел математики, который обобщает классическую формальную логику и теорию множеств. Теория множеств базируется на понятии нечеткого множества. Впервые термин нечеткого множества был введен американским ученым Лютфи Заде в 1965г.

Обработка нечеткой информации и нечеткий вывод давно применяются в различных интеллектуальных системах, однако наиболее широкое распространение нечеткие системы получили в области управления.

Направление нечетких систем базируется на принципах нечеткой логики и теории нечетких множеств – раздела математики, являющегося обобщением классической логики и теории множеств. Данные понятия были впервые предложены американский ученым Лотфи Заде в 1965 г. Основной причиной появления новой теории стало наличие нечетких и приближенных рассуждений при описании человеком процессов, систем, объектов. В общем случае механизм логического вывода в рамках нечеткой логики включает в себя четыре этапа: введение нечеткости (фазификация), нечеткий вывод, композиция и приведение к четкости или дефазификация. Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефазификации [11].

Общая схема обработки нечеткой информации представлена на рисунке (рисунок 1). Точные исходные данные с датчиков, контролирующих управляющий процесс, переводятся в значения лингвистических переменных в специальном блоке, получившем название «фазификатор». Далее реализуются процедуры нечеткого вывода на множестве продукционных правил, составляющих базу зна-

ний системы управления, в результате чего формируются выходные лингвистические значения, которые переводятся в точные значения результатов вычислений в блоке «дефазификатор». На выходе последнего формируются управляющие воздействия, подаваемые на исполнительные механизмы. Эта концептуальная схема лежит в основе так называемого нечеткого контроллера, используемого в интеллектуальных системах обработки неопределенной информации, в частности, в «интеллектуальных» системах управления.

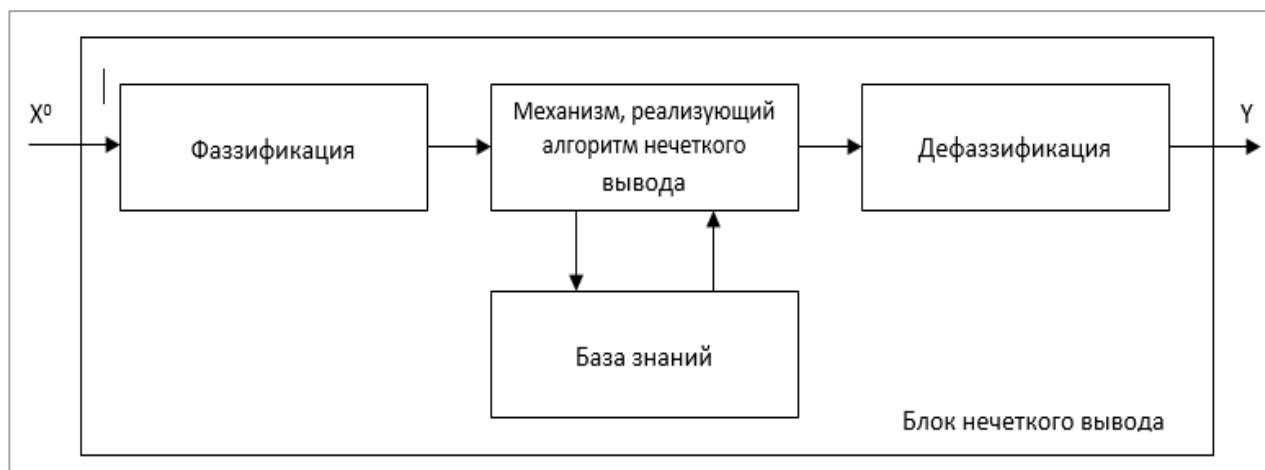


Рисунок 1 – Структура блока нечеткого вывода

В классических нечетких регуляторах не предусмотрены механизмы адаптации в реальном времени к изменяющимся характеристикам взаимодействия объекта управления с окружающей средой, что не позволяет применять нечеткие системы для управления объектами с изменяющимся во времени свойствами. Однако существует ряд методов, расширяющих возможности нечетких регуляторов в этой области [1].

Одним из серьёзных недостатков нечетких систем управления является невозможность предсказания поведения системы на несколько шагов вперед, так как существующий математический аппарат нечеткой логики позволяет строить правила управления, связывающие лишь текущее состояние объекта с желаемым при помощи управляющего воздействия, которое необходимо предпринять в текущей ситуации [2].

1.2.1. Область применения нечетких систем управления

Среди причин распространения Fuzzy-управления, обычно, выделяют следующее:

- 1) особые качества систем управления с нечеткой логикой, в частности малая чувствительность к изменению параметров объекта управления;
- 2) синтез систем управления с нечеткой логикой при применении современных средств аппаратной и программной поддержки зачастую проще, чем традиционных.

Как и у любых систем управления у систем с нечеткой логикой существует область, в которой их применение является наиболее предпочтительным. В качестве таких областей, обычно, выделяют следующие:

- 1) системы регулирования, для которых модель объекта управления определена лишь качественно;
- 2) надстройка над традиционными системами регулирования (например, над ПИД-регуляторами) для придания им адаптивных свойств;
- 3) воспроизведение действий человека-оператора;
- 4) системы организационного управления верхнего уровня.

Общей предпосылкой для применения нечетких систем управления является, с одной стороны, наличие неопределенности, связанной как с отсутствием информации, так и сложностью системы, и невозможностью или нецелесообразностью ее описания традиционными методами, и с другой стороны, наличие об объекте, необходимых управляющих воздействиях, возмущениях и т. п. информации качественного характера.

1.2.2. Системы нечеткого вывода

Понятие нечеткого вывода занимает центральное место в нечеткой логике и в теории нечеткого управления. Говоря о нечеткой логике в системах управления, можно дать следующее определение системы нечеткого вывода.

Система нечеткого вывода – это процесс получения нечетких заключений о требуемом управлении объектом на основе нечетких условий или предпосылок, представляющих собой информацию о текущем состоянии объекта.

Этот процесс соединяет в себе все основные концепции теории нечетких множеств: функции принадлежности, лингвистические переменные, методы нечеткой импликации и т.п. Разработка и применение систем нечеткого вывода включает в себя ряд этапов, реализация которых выполняется на основе положений нечеткой логики (Рисунок 2).

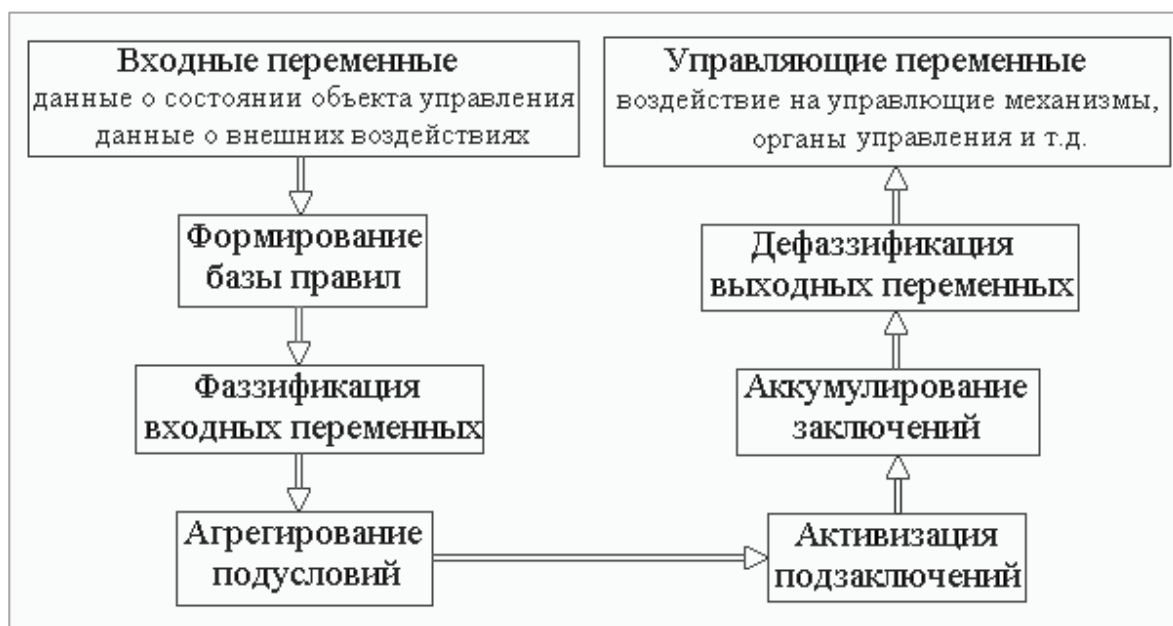


Рисунок 2 – Диаграмма процесса нечеткого вывода в нечетких САУ

База правил систем нечеткого вывода предназначена для формального представления эмпирических знаний экспертов в той или иной предметной области в форме нечетких продукционных правил. Таким образом, база нечетких продукционных правил системы нечеткого вывода – это система нечетких продукционных правил, отражающая знания экспертов о методах управления объектом в различных ситуациях, характере его функционирования в различных условиях и т.п., т.е. содержащая формализованные человеческие знания.

Нечеткое продукционное правило – это выражение вида:

$$(i): Q; P; A \rightarrow B; S; F; N$$

где (i) — имя нечеткой продукции;

Q — сфера применения нечеткой продукции;

P — условие применимости ядра нечеткой продукции;

$A \rightarrow B$ — ядро нечеткой продукции, в котором A — условие ядра (или антецедент), B — заключение ядра (или консеквент),

\rightarrow — знак логической секвенции или следования;

S — метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения ядра;

F — коэффициент определенности или уверенности нечеткой продукции;

N — постусловия продукции.

Сфера применения нечеткой продукции Q описывает явно или неявно предметную область знания, которую представляет отдельная продукция.

Условие применимости ядра продукции P представляет собой логическое выражение, как правило предикат. Если оно присутствует в продукции, то активизация ядра продукции становится возможной только в случае истинности этого условия. Во многих случаях этот элемент продукции может быть опущен или введен в ядро продукции.

Ядро $A \rightarrow B$ является центральным компонентом нечеткой продукции. Оно может быть представлено в одной из более распространенных форм:

«ЕСЛИ A ТО B », «IF A THEN B »;

где A и B — некоторые выражения нечеткой логики, которые наиболее часто представляются в форме нечетких высказываний.

В качестве выражений могут использоваться и составные логические нечеткие высказывания, т.е. элементарные нечеткие высказывания, соединенные нечеткими логическими связками, такими как нечеткое отрицание, нечеткая конъюнкция, нечеткая дизъюнкция.

S — метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения B на основе известного значения степени истинности усло-

вия А. Данный способ определяет схему или алгоритм нечеткого вывода в продукционных нечетких системах и называется методом композиции или методом активации.

Коэффициент уверенности F выражает количественную оценку степени истинности или относительный вес нечеткой продукции. Коэффициент уверенности принимает свое значение из интервала $[0;1]$ и часто называется весовым коэффициентом нечеткого правила продукции.

Постусловие нечеткой продукции N описывает действия и процедуры, которые необходимо выполнить в случае реализации ядра продукции, т.е. получения информации об истинности В. Характер этих действий может быть самым различным и отражать вычислительный или иной аспект продукционной системы.

Согласованное множество нечетких продукционных правил образует нечеткую продукционную систему. Таким образом, нечеткая продукционная система — это относящийся к определенной предметной области список нечетких продукционных правил «IF A THEN B».

Простейший вариант нечеткого продукционного правила:

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ $\beta 1$ «ЕСТЬ $\alpha 1$ », ТО « $\beta 2$ ЕСТЬ $\alpha 2$ »

RULE <#>: IF « $\beta 1$ IS $\alpha 1$ » THEN « $\beta 2$ display: block IS $\alpha 2$ ».

Антецедент и консеквент ядра нечеткой продукции может быть сложным, состоящим из связок «И», «ИЛИ», «НЕ», например:

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ « $\beta 1$ ЕСТЬ α » И « $\beta 2$ ЕСТЬ НЕ α » ТО « $\beta 1$ ЕСТЬ НЕ $\beta 2$ »

RULE <#>: IF « $\beta 1$ IS α » AND « $\beta 2$ IS NOT α » THEN « $\beta 1$ IS NOT $\beta 2$ ».

Наиболее часто база нечетких продукционных правил представляется в форме согласованного относительно используемых лингвистических переменных структурированного текста:

ПРАВИЛО_1: ЕСЛИ «Условие_1» ТО «Заключение_1» (F 1 т),

ПРАВИЛО_n: ЕСЛИ «Условие_n» ТО «Заключение_n» (F n),

где $F_i \in [0;1]$ является коэффициентом определенности или весовым коэффициентом соответствующего правила.

Согласованность списка означает, что в качестве условий и заключений правил могут использоваться только простые и составные нечеткие высказывания, соединенные бинарными операциями «И», «ИЛИ», при этом в каждом из нечетких высказываний должны быть определены функции принадлежности значений терммножества для каждой лингвистической переменной. Как правило, функции принадлежности отдельных термов представляют треугольными или трапецеидальными функциями. Для наименования отдельных термов принято использовать следующие сокращения, приведенные в Таблица 2.

Таблица 2 – Именованние термов лингвистической функции

Символьное обозначение	Англоязычная нотация	Русскоязычная нотация
NB	Negative Big	Отрицательное большое
NM	Negative Middle	Отрицательное среднее
NS	Negative Small	Отрицательное малое
ZN	Zero Negative	Отрицательное, близкое к нулю
Z	Zero	Нуль, близкое к нулю
ZP	Zero positive	Положительное, близкое к нулю
PS	Positive Small	Положительное среднее
PM	Positive Middle	Положительное малое
PB	Positive Big	Положительное большое

Фаззификация (введение нечеткости) – это установка соответствия между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной. На этапе фаззификации значениям всех входным переменным системы нечеткого вывода, полученным внешним по отношению к системе нечеткого вывода способом, например, при помощи датчиков, ставятся в соответствие конкретные значения функций принадлежности соответствующих лингвистических термов, которые используются в условиях (антецедентах) ядер нечетких продукционных правил, составляющих базу нечетких продукционных правил системы нечеткого вывода.

Фаззификация считается выполненной, если найдены степени истинности $\mu_A(x)$ всех элементарных логических высказываний вида « β ЕСТЬ α », входящих в антецеденты нечетких продукционных правил, где α — некоторый терм с известной функцией принадлежности $\mu_A(x)$, а — четкое численное значение, принадлежащее универсуму лингвистической переменной β .

Агрегирование — это процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. При этом используются полученные на этапе фаззификации значения функций принадлежности термов лингвистических переменных, составляющих вышеупомянутые условия (антецеденты) ядер нечетких продукционных правил.

Если условие нечеткого продукционного правила является простым нечетким высказыванием, то степень его истинности соответствует значению функции принадлежности соответствующего терма лингвистической переменной.

Если условие представляет составное высказывание, то степень истинности сложного высказывания определяется на основе известных значений истинности составляющих его элементарных высказываний при помощи введенных ранее нечетких логических операций в одном из оговоренных заранее базисов.

Активизация в системах нечеткого вывода — это процедура или процесс нахождения степени истинности каждого из элементарных логических высказываний (подзаключений), составляющих консеквенты ядер всех нечетких продукционных правил. Поскольку заключения делаются относительно выходных лингвистических переменных, то степеням истинности элементарных подзаключений при активизации ставятся в соответствие элементарные функции принадлежности.

Если заключение (консеквент) нечеткого продукционного правила является простым нечетким высказыванием, то степень его истинности равна алгебраическому произведению весового коэффициента и степени истинности антецедента данного нечеткого продукционного правила.

Если заключение представляет составное высказывание, то степень истинности каждого из элементарных высказываний равна алгебраическому произведению весового коэффициента и степени истинности антецедента, данного нечеткого продукционного правила.

Если весовые коэффициенты продукционных правил не указаны явно на этапе формирования базы правил, то их значения по умолчанию равны единице.

Функции принадлежности $\mu(y)$ каждого из элементарных подзаключений консеквентов всех продукционных правил находятся при помощи одного из методов нечеткой композиции:

- min – активация:

$$\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\}; \quad (1.1)$$

- prod – активация:

$$\mu'(y) = c_i \cdot \mu(y); \quad (1.2)$$

- average – активация:

$$\mu'(y) = 0.5(c_i + \mu(y)). \quad (1.3)$$

где $\mu(x)$ и c — соответственно функции принадлежности термов лингвистических переменных и степени истинности нечетких высказываний, образующих соответствующие следствия (консеквенты) ядер нечетких продукционных правил.

Аккумуляция (или аккумуляирование) в системах нечеткого вывода – это процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель аккумуляции состоит в объединении всех степеней истинности подзаключений для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных. Результат аккумуляции для каждой выходной лингвистической переменной определяется как объединение нечетких множеств всех подзаключений нечеткой базы правил относительно соответствующей лингвистической переменной.

Объединение функций принадлежности всех подзаключений проводится как правило классически:

$$MF_{AB}(x) = \max(MF_A(x), MF_B(x)), \quad (1.4)$$

где $MF_A(x)$ и $MF_B(x)$ — функции принадлежности множеств А и В.

Дефаззификация в системах нечеткого вывода – это процесс перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к её четкому (числовому) значению. Цель дефаззификации состоит в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить количественные значения для каждой выходной переменной, которое используется внешними по отношению к системе нечеткого вывода устройствами (исполнительными механизмами интеллектуальной САУ).

Переход от полученной в результате аккумуляции функции принадлежности $\mu(x)$ выходной лингвистической переменной к численному значению y выходной переменной производится одним из следующих методов:

- метод центра тяжести (Centre of Gravity) заключается в расчете центра тяжести площади

$$y = \frac{\int_{min}^{max} x\mu(x)dx}{\int_{min}^{max} \mu(x)dx}, \quad (1.5)$$

где y — результат фаззификации;

x — переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной и принимающая значения от $x = min$ до $x = max$; min и max — левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества;

$\mu(x)$ — функция принадлежности нечеткого множества.

- метод центра площади (Centre of Area) заключается в расчете абсциссы y , делящей площадь, ограниченную кривой функции принадлежности $\mu(x)$, так называемой биссектрисы площади

$$\int_{min}^u \mu(x)dx = \int_u^{max} \mu(x)dx, \quad (1.6)$$

где биссектриса площади $y = u$.

- метод левого модального значения определяется по формуле:

$$y = \min\{x_m\},$$

где x_m — модальное значение (наименьшая из мод, самая левая) значение нечеткого множества.

- метод правого модального значения рассчитывается по формуле:

$$y = \max\{x_m\},$$

где x_m — модальное значение (наибольшая из мод, самая правая) значение нечеткого множества.

Рассмотренные этапы нечеткого вывода могут быть реализованы неоднозначным образом: агрегирование может проводиться не только в базисе нечеткой логики Заде, активизация может проводиться различными методами нечеткой композиции, на этапе аккумуляции объединение можно провести отличным от \max -объединения способом, дефаззификация также может проводиться различными методами. Таким образом, выбор конкретных способов реализации отдельных этапов нечеткого вывода определяет тот или иной алгоритм нечеткого вывода. В настоящее время остается открытым вопрос критериев и методов выбора алгоритма нечеткого вывода в зависимости от конкретной технической задачи. На текущий момент в системах нечеткого вывода наиболее часто применяются следующие алгоритмы.

1.2.3. Алгоритм Мамдани

Алгоритм Мамдани (Mamdani) был предложен в 1975 г. английским математиком Е. Мамдани в качестве метода для управления паровым двигателем и получил наибольшее применение в системах нечёткого вывода.

Формально алгоритм Мамдани может быть определен следующим образом:

- формирование базы правил систем нечёткого вывода;
- процедура фаззификации (введение нечёткости) входных переменных.

Каждому значению отдельной входной переменной ставится в соответствие зна-

чение функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной – $\mu_1(x)$, $\mu_2(x)$, ..., $\mu_n(x)$, где $\mu_1(x)$, ..., $\mu_n(x)$ – функции принадлежности для переменной x ;

- нечёткий вывод или нахождение степеней истинности (уровней «отсечки») для предпосылок («Condition №1», «Condition №2», ..., «Condition №N») каждого из правил. Процедура нахождения степеней истинности также называется агрегированием;

- процедура активизации, то есть нахождение усечённой функции принадлежности для выходной переменной. Для этой цели можно использовать один из модифицированных методов нечёткой композиции: \min – активация, prod – активация, average – активация.

В приведённых методах множество $C = (c_1, c_2, \dots, c_q)$ – множество степеней истинности для каждого из правил; q – общее количество подзаключений («Conclusion №1», «Conclusion №2», ..., «Conclusion №N») в базе правил; $\mu(x)$ – функция принадлежности терма, который является значением некоторой выходной переменной из универсума Y ;

- композиция (процедура аккумуляции) или объединение найденных усечённых функций с целью получения итогового нечёткого множества для выходной переменной и результирующей функции принадлежности;

- процедура дефаззификации (приведение к чёткости) выходных переменных. На этапе дефаззификации может быть применён метод центра тяжести или метод биссектрисы площади.

1.2.4. Алгоритм Такаги-Сугено

Алгоритм Сугено, предложенный Сугено и Такаги, формально может быть задан следующим набором правил:

- формирование базы правил систем нечёткого вывода. База правил содержит набор продукционных правил только в форме: если «Предпосылка 1» и «Предпосылка 2», то «Заключение 1», где выходной переменной является некоторое действительное число;

- процедура фаззификации (введение нечёткости) входных переменных. Процедура фаззификации входных переменных совпадает с процедурой фаззификации в алгоритме Мамдани;

- процедура агрегирования или нахождение уровней «отсечки» для всех правил нечётких продукций. Для нахождения степеней истинности используется операция \min – конъюнкции;

- процедура активизации подзаключений в нечётких правилах продукций. Рассчитываются значения степеней истинности всех заключений правил нечётких продукций; осуществляется расчёт обычных (не нечётких) значений выходных переменных каждого правила в форме; определяется множество $C = (c_1, c_2, \dots, c_q)$ и множество значений выходных переменных $W = (w_1, w_2, \dots, w_q)$, где q – общее количество правил из базы правил;

- композиция (процедура аккумуляции) или объединение найденных усечённых функций с целью получения итогового нечёткого множества для выходной переменной и результирующей функции принадлежности. Данная процедура практически отсутствует, т.к. для расчётов используются действительные числа;

- процедура дефаззификации выходных переменных. Используется модифицированный вариант в форме:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n A_i c_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (1.7)$$

где c_i — чёткие значения заключений (действительные числа);

A_i — степени истинности для предпосылок или условий каждого из правил.

1.3 Нечеткая логика в системах автоматического управления

Нечёткое управление (управление на основе методов теории нечётких множеств) используется при недостаточном знании объекта управления, но наличии опыта управления им, в нелинейных системах, идентификация которых слишком трудоёмка, а также в случаях, когда по условию задачи необходимо использовать

знания эксперта. Примером может быть доменная печь или ректификационная колонна, математическая модель которых содержит много эмпирических коэффициентов, изменяющихся в широком диапазоне и вызывающих большие затруднения при идентификации [12]. В то же время квалифицированный оператор достаточно хорошо управляет такими объектами, пользуясь показаниями приборов и накопленным опытом.

ПИД-регуляторы с нечёткой логикой в настоящее время используются в коммерческих системах для наведения телекамер при трансляции спортивных событий, в системах кондиционирования воздуха, при управлении автомобильными двигателями, для автоматического управления двигателем пылесоса и в других областях.

Поскольку информация, полученная от оператора, выражена словесно, для её использования в ПИД-регуляторах применяют лингвистические переменные и аппарат теории нечётких множеств, который был разработан Л. Заде в 1965 году [13]. Основная идея этой теории состоит в следующем. Если в теории чётких множеств некоторый элемент (например, температура 50°) может принадлежать множеству (например, множеству «температура горячей воды $T_{гор.}$ ») или не принадлежать ему, то в теории нечётких множеств вводится понятие функции принадлежности, которая характеризует степень принадлежности элемента множеству. При этом говорят, например, «температура 50° принадлежит множеству $T_{гор.}$ со степенью принадлежности $0,264$ ». Функцию принадлежности можно приближённо трактовать как вероятность того, что данный элемент принадлежит множеству [14], однако такая интерпретация, хотя и является для инженеров более понятной, не является математически строгой, поскольку существующая теория нечётких множеств не оперирует понятием вероятности.

В 1974 году Мамдани [15] показал возможность применения идей нечёткой логики для построения системы управления динамическим объектом, а годом позже вышла публикация Мамдани (Mamdani) и Assilian, в которой описывался нечёткий ПИ-регулятор и его применение для управления парогенератором. С

тех пор область применения нечётких регуляторов постоянно расширяется, увеличивается разнообразие их структур и выполняемых функций. Нечёткая логика в ПИД-регуляторах используется преимущественно двумя путями: для построения самого регулятора и для организации подстройки коэффициентов ПИД-регулятора. Оба пути могут использоваться в ПИД-контроллере одновременно.

Настройка ПИД-регулятора по формулам обычно не является оптимальной и может быть улучшена с помощью дальнейшей подстройки. Подстройка может быть выполнена оператором на основании эвристических правил или автоматически, с помощью блока нечёткой логики (рисунок 3). Блок нечёткой логики (фаззи-блок) использует базу правил и методы нечёткого вывода. Фаззи-подстройка позволяет уменьшить перерегулирование, снизить время установления и повысить робастность ПИД-регулятора [17]. Процесс автонастройки регулятора с помощью блока нечёткой логики начинается с поиска начальных приближений коэффициентов регулятора K , T_i , T_d . Обычно это делается методом Зиглера-Никольса, исходя из периода собственных колебаний в замкнутой системе и петлевого усиления.

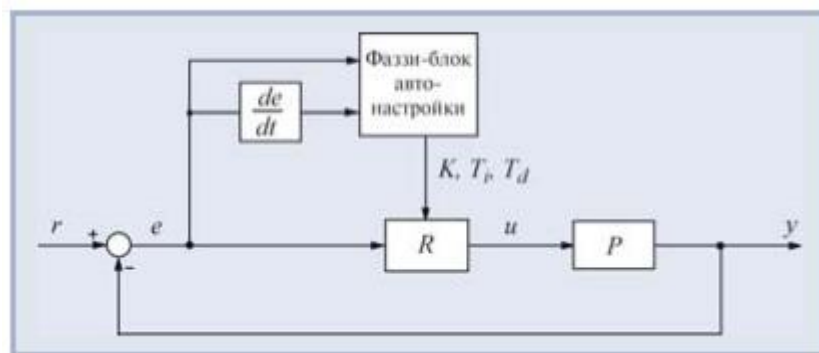


Рисунок 3 – Структура ПИД-регулятора с блоком автонастройки на основе нечёткой логики

Далее формулируется критериальная функция, необходимая для поиска оптимальных значений параметров настройки методами оптимизации. В процессе настройки регулятора используется несколько шагов [14]. Сначала выбираются диапазоны входных и выходных сигналов тюнера (блока автонастройки),

форма функций принадлежности искомых параметров, правила нечёткого вывода, механизм логического вывода, метод дефаззификации и диапазоны масштабных множителей, необходимых для пересчёта чётких переменных в нечёткие.

Поиск параметров регулятора выполняется методами оптимизации. Для этого выбирается целевая функция как интеграл от суммы квадратов ошибки регулирования и времени установления. В критерий минимизации иногда добавляют скорость нарастания выходной переменной объекта. В качестве искомых параметров (параметров, которые надо найти) выбирают положение максимумов функций принадлежности и масштабные коэффициенты на входе и выходе фаззификатора. К задаче оптимизации добавляют ограничения на диапазон изменения позиции функций принадлежности. Оптимизация критериальной функции может быть выполнена, например, с помощью генетических алгоритмов. Следует отметить, что в случаях, когда информации достаточно для получения точной математической модели объекта, традиционный регулятор всегда будет лучше нечёткого потому, что при синтезе нечёткого регулятора исходные данные заданы приближённо.

2 Объект исследования

2.1 Устройство асфальтоукладчика

Устройство и работа асфальтоукладчика показана на рисунке (рисунок 4). Асфальтобетонная смесь из кузова автосамосвала 1, перемещаемого во время выгрузки толкающим усилием роликов 2 укладчика, выгружается в приемный бункер 3. Из бункера смесь через регулируемое разгрузочное отверстие 5 у дна бункера подается скребковыми питателями 4 на дорожное полотно. Количество поступающей из бункера смеси регулируется положением заслонки 11 [7].

Смесь на дорожном полотне [4] распределяется по всей ширине винтовыми конвейерами 6, уплотняется и выравнивается трамбующим брусом 7 и выравнивающей плитой 8. Для получения заданного поперечного профиля

(плоского горизонтального, одно- или двухскатного) выглаживающая плита по длине разделена на две части, соединенные внизу шарниром, а сверху – винтовой стяжкой.

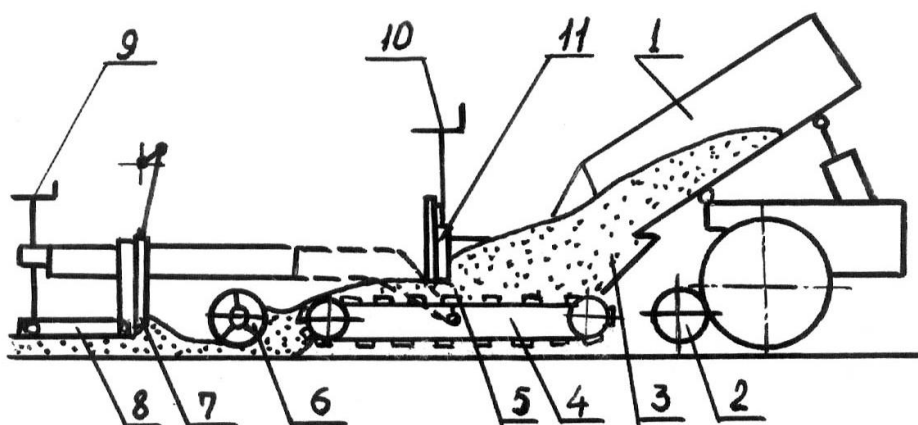


Рисунок 4 – Технологическая схема асфальтоукладчика

Толщину укладываемого слоя смеси по всей ширине регулируют, поднимая или опуская края выглаживающей плиты с помощью винтов регулятора толщины 9. Для изменения ширины укладываемой полосы предусмотрены уширители распределительных шнеков, трамбующего бруса и выглаживающей плиты. Асфальтоукладчики оборудованы системой автоматического регулирования, которая обеспечивает контроль и регулирование продольного профиля и поперечного уклона поверхности укладываемого покрытия. Ровность покрытия создается с помощью натянутого стального каната или бордюра, а также поверхности основания или покрытия соседней полосы.

2.2 Гидравлический привод асфальтоукладчика

Общая гидравлическая система, Рисунок 4, включает в себя главный контур, который содержит регулируемый насос Н1 и гидромотор М, систему подпитки, обеспечивающую создание подпора во всасывающей линии для устранения кавитации и компенсацию утечек, систему предохранения трансмиссии от перегрузки, систему управления трансмиссией, систему отвода избытка нагре-

той рабочей жидкости, прошедшей гидромотор, на слив и систему кондиционирования рабочей жидкости, включающей фильтр тонкой очистки Φ , охладитель X и гидробак [8].

Аксиально-поршневой регулируемый реверсивный насос $H1$ преобразует механическую энергию дизельного двигателя в гидравлическую, создавая в напорной линии поток рабочей жидкости, а аксиально-поршневой нерегулируемый реверсивный гидромотор M преобразует энергию жидкости в механическую на выходном валу. Таким образом, в системе «насос – гидромотор» гидрообъемной трансмиссии происходит замкнутая циркуляция рабочей жидкости.

Система подпитки включает в себя шестеренный насос $H2$, обратные клапаны $KO1$ и $KO2$ и предохранительный клапан $KП4$. Насос $H2$ подает охлажденную жидкость из бака через клапан $KO1$ или $KO2$ во всасывающую линию в зависимости от направления подачи жидкости насосом $H1$. Клапан $KП4$ предотвращает случайное повышение давления. Система управления гидрообъемной трансмиссией включает: насос подпитки $H2$, гидрораспределитель $P1$ с тягами и педалями для изменения рабочей позиции золотника, гидроцилиндр $Ц$ для регулирования подачи насоса $H1$ и дроссель $ДР$. При переключении распределителя $P1$ в ту или другую рабочую позицию осуществляется регулирование подачи основного насоса $H1$ и, как следствие, регулирование частоты вращения вала гидромотора M .

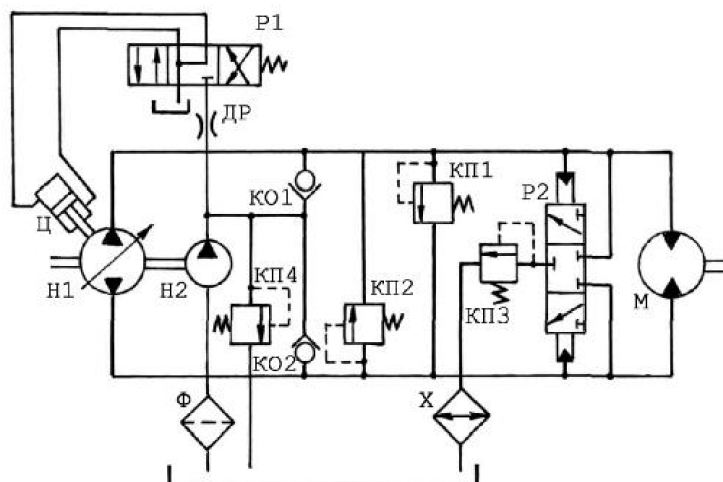


Рисунок 5 – Гидравлическая схема привода ведущих колес

Система предохранения от перегрузки представлена двумя предохранительными клапанами высокого давления КП1 и КП2, которые в случае превышения нагрузки на валу гидромотора М сбрасывают рабочую жидкость из напорной линии во всасывающую в обход гидромотора. Наличие двух клапанов обусловлено реверсивностью насоса Н1. Система отвода нагретой жидкости включает распределитель Р2 и клапан КП3. Так как подача насоса Н2 больше утечек, то образующийся во всасывающей линии излишек рабочей жидкости (нагретой после выхода из гидромотора) через гидравлически управляемый золотниковый распределитель Р2 и переливной клапан КП3 поступает к охладителю Х и далее на слив.

Клапан КП3 ограничивает давление подпитки, а распределитель Р2 обеспечивает соединение клапана КП3 с всасывающей линией и блокирует поступление к нему жидкости из напорной линии.

3 Разработка системы управления скоростью движения асфальтоукладчика

Асфальтоукладчик представляет собой самоходную машину, в состав которой входят бункер для подаваемой смеси, шнековые питатели, передняя и задняя рамы, кабина, механизм цифровой обработки поверхности для регулирования укладки. Рабочим органом асфальтоукладчика (в зависимости от модели) является трамбуемый брус со встроенным вибровозбудителем [9].

Для разработки современной системы управления рабочими режимами асфальтоукладчика в процессе укладки асфальтобетонной смеси требуется проведение теоретических исследований на основе математических моделей. Далее мы рассмотрим математическую модель процесса управления скоростью движения асфальтоукладчика с учетом динамики гидрообъемной трансмиссии.

Разработка математической модели в пространстве состояний и теоретические рассуждения проводятся в терминах переменных состояний. Гидроконтур привода хода колесного асфальтоукладчика включает в себя регулируемый насос привода хода и два гидромотора.

Гидропривод колес асфальтоукладчика как управляемую систему можно представить в виде двух подсистем: гидравлической и гидромеханической. Переменной состояния, характеризующей гидравлическую подсистему, выступает величина гидравлического давления $P(t)$ потока жидкости, создаваемая насосом относительно давления в сливном баке.

Переменной состояния, характеризующей гидромеханическую подсистему, является величина $\omega_m(t)$ скорости вращения вала гидромотора под воздействием давления потока жидкости.

3.1 Математическая модель объекта управления в терминах пространства переменных состояния

Уравнение состояния гидравлической подсистемы без учета ограничения на управляющее воздействие $u(t)$, изменяющего величину гидравлического давления $P(t)$,

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{K_{loss}}{K_{el}}P(t) - \frac{q_m}{K_{el}}\omega_m(t) + \frac{q_p}{K_{el}}\omega_e(t) \cdot u(t), \quad (3.1)$$

где K_{loss} — коэффициент, учитывающий потери давления в гидравлической линии при передаче, с м⁴/кг;

K_{el} — коэффициент упругости трубопровода с жидкостью передающей гидравлической линии, м⁵/Н;

$P(t)$ — гидравлическое давление потока жидкости, Па;

q_m — максимальный рабочий объем гидравлического двигателя колеса, м³;

q_p — максимальный рабочий объем насоса, м³;

$\omega_m(t)$ — частота вращения вала гидромотора, рад/с;

$\omega_e(t)$ — частота вращения вала двигателя, рад/с;

$u(t)$ — управляющее воздействие.

Коэффициент упругости трубопровода с жидкостью определяется выражением:

$$K_{el} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{4E_{el}}, \quad (3.2)$$

где d и L – диаметр и длина трубопровода соответственно, м.

E_{el} – приведённый обменный модуль упругости трубопровода с жидкостью, Па:

$$E_{el} = \frac{E_{flu}}{1 + \frac{d}{\delta_{pip}} \cdot \frac{E_{flu}}{E_{pip}}}, \quad (3.3)$$

где E_{flu} — модуль упругости жидкости, Па;

E_{pip} — модуль упругости материала трубопровода, Па;

δ_{pip} — толщина стенки трубопровода, м.

Управляющее воздействие [10] гидравлической подсистемы $u(t)$ изменяет производительность насоса, может быть как положительным, так и отрицательным. Управляющее воздействие ограничено по абсолютному значению

$$|u(t)| \leq 1. \quad (3.4)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{K_{loss}}{K_{el}}; \quad a_{12} = -\frac{q_m}{K_{el}}; \quad b_{11} = \frac{q_p}{K_{el}} \omega_e(t); \quad x_1(t) \\ &= P(t); \quad x_2(t) = \omega_m(t) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Тогда уравнение состояния гидравлической подсистемы (3.1) можно записать в стандартной форме (2.3):

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = a_{11} \cdot x_1(t) + a_{12} \cdot x_2(t) + b_{11} \cdot u(t). \quad (3.6)$$

Переменной состояния, характеризующей гидромеханическую подсистему, является величина скорости вращения $\omega_m(t)$ вала гидромотора, изменяющейся под воздействием давления на входе, создаваемого относительно давления в сливной магистрали.

$$\frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{q_m - b_p}{J_b} P(t) - \frac{b_\omega}{J_b} \omega_m(t) - \frac{1}{J_b} M_n(t), \quad (3.7)$$

Уравнение состояния записывается для одного гидромотора, эквивалентного двум параллельно работающим. Эквивалентность обеспечивается равенством мгновенных значений угловых скоростей колес при допущении об абсолютной жесткости рамы асфальтоукладчика и достигается соответствующим изменением параметров гидромотора и его нагрузки : где J_b – приведенный к валу двигателя момент инерции, кг·м²; b_ω – коэффициент гидромеханических потерь, зависящих от угловой скорости, Н·м·с; b_p – коэффициент гидромеханических потерь, зависящих от давления на входе гидромотора, м³.

Возмущающее воздействие, момент нагрузки $M_n(t)$, определяется влиянием указанного момента на угловое ускорение валцов уплотняемой асфальтобетонной смеси при движении асфальтоукладчика и зависит от режима его работы.

Введем обозначения:

$$a_{21} = \frac{q_m - b_p}{J_b}; \quad a_{22} = -\frac{b_\omega}{J_b}; \quad b_{22} = -\frac{1}{J_b}; \quad x_1(t) = P(t); \quad x_2(t) = \omega_m(t).$$

Тогда уравнение состояния гидромеханической системы (3.7) запишется в следующей стандартной форме:

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = a_{21} \cdot x_1(t) + a_{22} \cdot x_2(t) + b_{22} \cdot M_n(t). \quad (3.8)$$

В результате преобразований получена математическая модель, в терминах пространства переменных состояния, описывающая рабочий процесс системы автоматического регулирования скоростью движения асфальтоукладчика. Уравнения состояния гидропривода хода как управляемой системы, таким образом, представлены в виде системы уравнений (3.9), два совместно решаемых уравнения (3.6) и (3.8) относительно гидравлического давления $x_1(t)$ и

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = a_{11} \cdot x_1(t) + a_2(t) + b_{11} \cdot u(t); \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = a_{21} \cdot x_1(t) + a_{22} \cdot x_2(t) + b_{22} \cdot M_n(t), \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = A \cdot X(t) + B \cdot U(t). \quad (3.10)$$

угловой скорости вращения колес $x_2(t)$ асфальтоукладчика: либо в виде одного векторно-матричного уравнения состояния (3.11).

Выражения для векторов состояния $X(t)$ и входных воздействий $U(t)$, матриц A , B следуют из сопоставления (3.6) и (3.8):

$$X(t) = [(x_1(t))' (x_2(t))']; U(t) = [(u(t))' (M_n(t))']; A = [(a_{11} \ a_{12})' (a_{21} \ a_{22})']; B = [(b_{11} \ 0)' (0 \ b_{22})']. \quad (3.11)$$

Уравнения состояния (3.6), характеризующие насос и гидромотор, получены с использованием теоретических моделей научных работ [9–11]. Уравнения (3.6), (3.8)-(3-11) также описывают в пространстве переменных состояния поведение системы регулирования скорости движения дорожного катка по каналу управляющего воздействия с учетом его ограничений и влияния среды. Полученные уравнения состояния позволяют перейти к описанию с использованием передаточных функций (матриц).

3.2 Решение задачи с использованием передаточных функций

Передаточная матрица, связывающая давление в гидравлической подсистеме с вектором входных воздействий, имеет следующий вид [5]:

$$A_m = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; B_3 = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{pmatrix}; C_{1m} = (1 \ 0); C_{2m} = (0 \ 1), \quad (3.12)$$

$$C_{1m}(s \cdot I - A_m)^{-1} B_3 = \frac{b_{11} \cdot (a_{22} - s)}{a_{12} \cdot a_{21} - a_{11} \cdot a_{22} - s^2 + a_{11} \cdot s + a_{22} \cdot s} \quad (3.13)$$

$$- \frac{a_{12} \cdot b_{22}}{a_{12} \cdot a_{21} - a_{11} \cdot a_{22} - s^2 + a_{11} \cdot s + a_{22} \cdot s} \quad (3.14)$$

Передаточная матрица, связывающая угловую скорость с вектором входных воздействий, такова:

$$C_{2m}(s \cdot I - A_m)^{-1} B_3 = - \frac{a_{21} \cdot b_{11}}{a_{12} \cdot a_{21} - a_{11} \cdot a_{22} - s^2 + a_{11} \cdot s + a_{22} \cdot s} + \frac{b_{22} \cdot (a_{11} - s)}{a_{12} \cdot a_{21} - a_{11} \cdot a_{22} - s^2 + a_{11} \cdot s + a_{22} \cdot s} \quad (3.15)$$

Используя полученные передаточные матрицы, введем передаточные функции, определяющие в динамике изменение давления в гидравлической подсистеме и изменение скорости вращения вала гидромотора в гидромеханической подсистеме. Передаточная функция, определяющая изменение давления относительно изменения управляющего воздействия $W_{pu}(s)$:

$$W_{pu}(s) = \frac{P(s)}{U(s)}; W_{pu}(s) = \frac{b_{11} \cdot (s - a_{22})}{s^2 - (a_{11} + a_{22}) \cdot s - a_{12} \cdot a_{21} + a_{11} \cdot a_{22}}. \quad (3.16)$$

Передаточная функция, определяющая изменение давления относительно изменения возмущающего воздействия $W_{pm}(s)$:

$$W_{pm}(s) = \frac{P(s)}{M(s)}; W_{pm}(s) = \frac{a_{12} - b_{22}}{s^2 - (a_{11} + a_{22}) \cdot s - a_{12} \cdot a_{21} + a_{11} \cdot a_{22}}. \quad (3.17)$$

Передаточная функция, определяющая изменение угловой скорости вращения колес относительно изменения управляющего воздействия $W_{\phi u}(s)$:

$$W_{\omega m}(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)}; W_{\omega m}(s) = \frac{a_{21} - b_{11}}{s^2 - (a_{11} + a_{22}) \cdot s - a_{12} \cdot a_{21} + a_{11} \cdot a_{22}}. \quad (3.18)$$

Передаточная функция, определяющая изменение угловой скорости вращения колес относительно изменения возмущающего воздействия $W_{\omega m}(s)$:

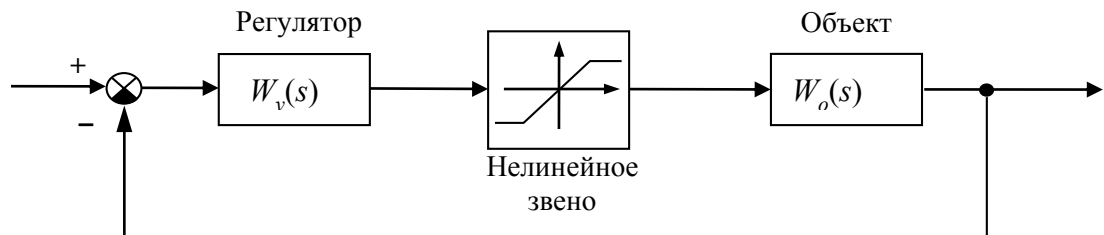
$$W_{\omega m}(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)}; W_{\omega m}(s) = \frac{b_{22} \cdot (s - a_{11})}{s^2 - (a_{11} + a_{22}) \cdot s - a_{12} \cdot a_{21} + a_{11} \cdot a_{22}}. \quad (3.19)$$

Здесь $P(s)$, $\Omega(s)$, $U(s)$, $M(s)$ являются изображениями по Лапласу соответствующих временных функций: $P(t)$, $\omega(t)$, $u(t)$, $M(t)$.

4 Синтез аналогового, цифрового и нечеткого ПИД-регулятора

4.1 Синтез аналогового ПИД-регулятора

Пропорционально-интегрально-дифференциальный [6] (ПИД, Proportional-Integral-Derivative – PID) регулятор – наиболее распространенная структура регулятора в управлении процессами и сервомеханизмами[10].



$W_o(s)$ – передаточная функция объекта регулирования; $y(s)$ – передаточная функция регулятора; $g(s)$ – задающее воздействие; $e(s)$ – ошибка регулирования; $u(s)$ – управляющее воздействие; $u(s)$ – управляющее воздействие с учетом влияния нелинейного звена; $y(s)$ – выходная регулируемая величина.

Рисунок 8 – Структурная схема аналогового регулятора

ПИД-регулятор вырабатывает выходной сигнал, являющийся суммой трех составляющих пропорционального регулирования (proportional control), регулирования по интегралу (integral control) и регулирования по производной (derivative control).

Первая часть $u_p(t)$ пропорциональна ошибке выходной величины, т.е. разности между выходной величиной и опорным значением, вторая часть $u_i(t)$ – интегралу по времени ошибки выходной величины, а третья часть $u_d(t)$ – производной ошибки.

Уравнение классического ПИД-регулятора имеет вид

$$u(t) = u_0 + K * \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.1)$$
$$= u_0 + u_p(t) + u_i(t) + u_d(t)$$

Параметр K – усиление регулятора (controller gain), T_i – постоянная времени интегрирования (integral time constant), а T_d – постоянная времени дифференцирования (derivative time constant). Коэффициент u_0 есть поправочное значение (correction value) или смещение (bias), настраивающее средний уровень выходного сигнала регулятора. Параметры K , T_i и T_d можно настроить – чаще всего с помощью ручек на панели управления регулятора. Усиление регулятора K может быть безразмерным, однако во многих приложениях оно выражается в технических единицах. Например, если изменяемое значение представляет собой расход [$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$], а управляющий сигнал выражается в вольтах, то усиление регулятора имеет размерность [$\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$].

Некоторые регуляторы, особенно старые модели, вместо усиления имеют настройку полосы пропорциональности (proportional band – PB), которая определяется как $PB = 100/K$ и обычно выражается в процентах. Это определение справедливо в том случае, если K безразмерно.

Классический регулятор – это теоретическая конструкция, которую нельзя точно воспроизвести на практике. Например, с математической точки зрения, выходной сигнал такого регулятора не ограничен. Выход реального регулятора, напротив, будет ограничен некоторыми пределами u_{\min} или u_{\max} , т. е. имеет вид, изображенный на рисунке (рисунок 6). Если пропорциональный регулятор имеет очень большое усиление, он ведет себя как двухпозиционный регулятор.

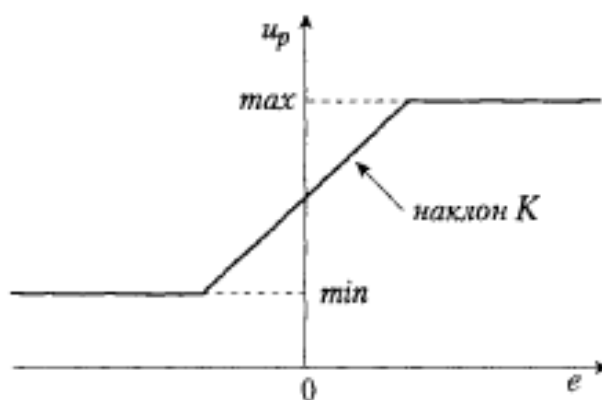
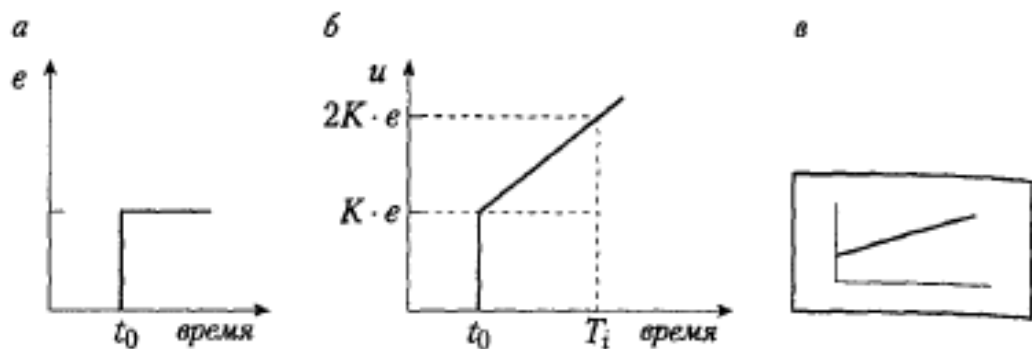


Рисунок 6 – Пропорциональное регулирование

Интегральная часть регулятора используется для устранения стационарных (steady-state) ошибок. Если замкнутая система, состоящая из физического процесса и регулятора, достигла стационарного состояния, все ее сигналы, в частности $e(t)$ и $u(t)$, постоянны. Стационарное состояние может сохраняться лишь при условии, что интегральная часть $u(t)$ постоянна, в противном случае $u_I(t)$ будет изменяться. Соответственно, интегральная часть остается постоянной, лишь если $e(t)$ равна нулю.

Постоянная времени интегрирования T_i присутствует в знаменателе уравнения (3.1) – таким образом, значения отдельных слагаемых уравнения регулятора оказываются соизмеримы. Подтверждение этому хорошо видно из переходной характеристики пропорционально-интегрирующего (ПИ) регулятора. Немедленно после скачка ошибки $e(t)$ на выходе регулятора имеем $K \cdot e$. По прошествии времени T_i выходная величина регулятора становится вдвое больше (рисунок 9). ПИ-регулятор часто символически изображается его переходной характеристикой.



а – скачок ошибки происходит в момент t_0 ; б – выход интегральной части регулятора возрастает с течением времени до тех пор, пока ошибка постоянна; в – обозначение ПИ-регулятора на блок-схеме

Рисунок 7 – Переходная характеристика ПИ-регулятора

Регулятор можно также описать с помощью преобразования Лапласа. Применяя его к уравнению (4.1), получим

$$\begin{aligned}
U(s) - U_0(s) &= \delta U(s) = U_P(s) + U_I(s) + U_D(s) = \\
&= K * \left[1 + \frac{1}{T_i * s} + T_d * s \right] * E(s) = \\
&= K * \frac{1 + T_i * s + T_i * T_d * s^2}{T_i * s} * E(s)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Рассмотрим процедуру синтеза параметров ПИД регулятора в среде Mathcad с передаточной функцией $W_y(s)$ в линейной системе. Объект регулирования имеет передаточную функцию $W_o(s)$ второго порядка.

$$W_y(s) := K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \text{ collect ,s} \rightarrow \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s} \tag{4.3}$$

$$W_o(s) := \frac{b_0}{a_0 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_2} \tag{4.4}$$

Передаточная функция разомкнутого контура с ПИД регулятором имеет вид:

$$W(s) := W_y(s) \cdot W_o(s) \text{ collect ,s} \rightarrow \frac{K_d \cdot b_0 \cdot s^2 + K_p \cdot b_0 \cdot s + K_i \cdot b_0}{a_0 \cdot s^3 + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s} \tag{4.5}$$

С целью применения современного программного обеспечения и численных методов исследования определим параметры ПИД регулятора в частотной области по методике аналитического синтеза [ФХ] для передаточной функции объекта с данными по выражению(3.4).

$$W_o(s) := \frac{1.1505 \cdot 10^2}{1.05 \cdot 10 \cdot s + 2.473 \cdot s^2 + 2.698 \cdot 10} \tag{4.6}$$

Принимаем запас устойчивости по фазе скорректированной системы $\gamma_1 = 60$ градусов, что в радианах составит

$$\gamma_1 := \frac{60}{180} \cdot \pi \quad \gamma_1 = 1.047$$

Принимаем частоту среза скорректированной разомкнутой системы

$$\omega_{1cp} := 5.1$$

Определяем ожидаемое время переходного процесса t_p в секундах:

$$t_p := \frac{8}{\omega_{1cp} \cdot \tan(\gamma_1)} \quad t_p = 0.906$$

При необходимости можно задаваться временем переходного процесса в скорректированной системе, а затем определять частоту среза.

Определяем модуль корректируемой системы на частоте среза и ее аргумент.

$$m_l := |W_p(\omega_{1cp})| \quad m_l = 1.762 \quad \arg(W_p(\omega_{1cp})) = -2.18$$

Определяем аргумент корректирующего устройства на частоте среза

$$\theta := -\pi + \gamma_1 - \arg(W_p(\omega_{1cp})) \quad \theta = 0.085$$

Определяем коэффициент передачи пропорциональной части корректирующего устройства

$$K_{1p} := m_l \cdot \cos(\theta) \quad K_{1p} = 1.756$$

Определяем K_i коэффициент передачи интегральной части корректирующего устройства по методике синтеза ПИ регулятора

$$K_i := 0.1 \cdot \omega_{1cp} \cdot K_{1p} \quad K_i = 0.895$$

Определяем K_d коэффициент передачи дифференциальной части корректирующего устройства

$$K_{1d} := \frac{K_{1i}}{\omega_{1cp}^2} + \frac{m_l}{\omega_{1cp}} \cdot \sin(\theta) \quad K_{1d} = 0.064$$

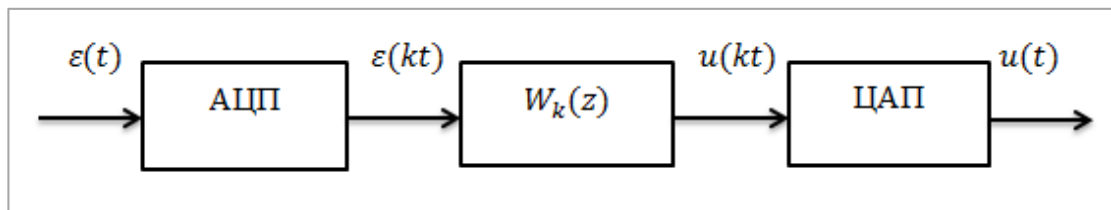
4.2 Синтез цифрового ПИД-регулятора

Существуют два подхода в синтезу цифрового ПИД-регулятора. В одном случае период квантования T , являющийся одновременно шагом численного интегрирования и дифференцирования, может быть выбран настолько малым, что все операции будут выполняться с очень высокой точностью. Тогда для определения K_P , K_I и K_D можно воспользоваться процедурами, которые применяются к аналоговым регуляторам [1].

Другой предполагает, что для образования передаточной функции регулятора $D(z)$ используются передаточные функции численного интегрирования и дифференцирования:

$$M(z) = D(z)E(z) = \left[K_p + \frac{K_i \cdot T \cdot z}{z - 1} + \frac{K_d \cdot (z - 1)}{T \cdot z} \right] E(z). \quad (4.7)$$

Структурная схема цифрового ПИД-регулятора представлена на рисунке (Рисунок 3).



АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
 $W_p(z)$ – дискретная передаточная функция.

Рисунок 8 – Структурная схема цифрового ПИД-регулятора

Задание показателей качества управления:

- Выходной сигнал отображен на блоке Score2, причем проход сигнала в 5 % зону должен быть не более 1 с.
- Перерегулирование $\sigma\%$ во всем диапазоне не должно превышать 8%.

Значения параметров аналогового ПИД-регулятора:

$$K_d = 0,615; K_i = 1,445; K_p = 2,634$$

4.2.1. Определение передаточной функции цифрового ПИД-регулятора

При переходе к цифровому варианту ПИД-регулятору [2], который определяется дискретной передаточной функцией $W_p(z)$, пропорциональная часть аналогового регулятора сохраняет свое значение Kp ; интегральная часть, в аналоговом варианте имеющая вид $\frac{K_i}{s}$, заменяется дискретной передаточной функцией $\frac{K_i \cdot T \cdot z}{z-1}$; а дифференциальная часть в аналоговом варианте имеющая вид $K_d \cdot s$, заменяется дискретной передаточной функцией $\frac{K_d \cdot (z-1)}{T \cdot z}$ [Ф-Х, С.530]. Таким образом, дискретная передаточная функция цифрового варианта регулятора будет иметь вид:

$$W_p(z) = Kp + \frac{K_i \cdot T \cdot z}{z-1} + \frac{K_d \cdot (z-1)}{T \cdot z} \quad (4.8)$$

где T — период дискретизации.

4.2.2. Определение разностного уравнения цифрового ПИД-регулятора

Полученной дискретной передаточной функции цифрового ПИД-регулятора соответствует разностное уравнение [3]:

$$U(k \cdot T) = U((k-1) \cdot T) + a \cdot \varepsilon(k \cdot T) + b \cdot \varepsilon((k-1) \cdot T) + c \cdot \varepsilon((k-2) \cdot T)$$

где U — выходная переменная цифрового ПИД-регулятора,

ε — входная переменная цифрового ПИД-регулятора (ошибка регулирования),

$$a = (Kp + K_i \cdot T + K_d \cdot T^{-1}) ;$$

$$b = -(Kp + 2 \cdot K_d \cdot T^{-1}) ; c = K_d \cdot T^{-1} .$$

Определяем параметры цифрового ПИД-регулятора: пропорциональная часть не изменяется, а интегральная и дифференциальная части будут иметь вид:

$$W_i(z) = \frac{K_i \cdot T \cdot z}{z - 1}$$

$$W_d(z) = \frac{K_d \cdot (z - 1)}{T \cdot z}$$

Принимаем период дискретизации цифрового регулятора:

$$T = 0.01, K_P = 2.634, K_I = 1.445, K_D = 0.615$$

$$\frac{K_i T^2 + K_P T + K_d}{T} = 64.148$$

$$\frac{-2K_d - K_P T}{T} = -125.634$$

$$\frac{K_d}{T} = 61.5$$

$$W_p(z) = \frac{64.148z^2 - 125.634z + 61.5}{z^2 - z} = 2.634 + \frac{0.014z}{z - 1} + \frac{61.5 \cdot (z - 1)}{z}$$

Принимаем период дискретизации цифрового регулятора:

$$T = 0.005, K_P = 2.634, K_I = 1.445, K_D = 0.615$$

$$\frac{K_i T^2 + K_P T + K_d}{T} = 125.641$$

$$\frac{-2K_d - K_P T}{T} = -248.634$$

$$\frac{K_d}{T} = 123$$

$$\begin{aligned} W_p(z) &= \frac{125.641z^2 - 248.634z + 123}{z^2 - z} \\ &= 2.634 + \frac{0.007225z}{z - 1} + \frac{123 \cdot (z - 1)}{z} \end{aligned}$$

4.3 Синтез нечеткого ПИД-регулятора

Синтез нечеткого регулятора начинается с составления базы правил. Синтез регулятора производится в среде Matlab&Simulink с помощью пакета Fuzzy Logic Toolbox.

Для вызова редактора базы правил необходимо в рабочей области Matlab выполнить команду «fuzzy».

При этом откроется окно редактора, в котором указывается:

- количество входных и выходных переменных;
- диапазоны изменения переменных;
- типы функций принадлежности.

Для данной работы был выбран нечеткий вывод Мамдани, Гауссов тип функций принадлежности (термов) входных переменных и треугольные термы выходной переменной (Рисунок 9).

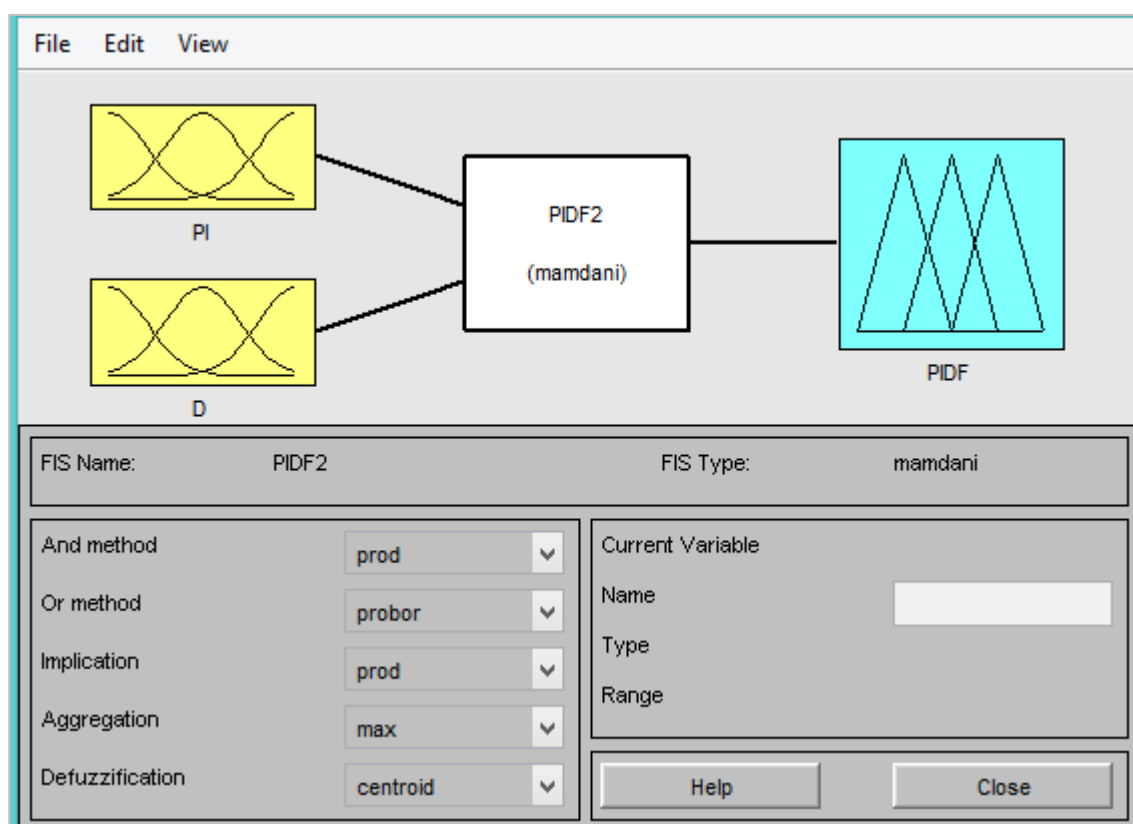


Рисунок 9 – Окно редактора «FIS Editor»

В данном окне также указывается:

- тип импликации — бинарная логическая связка, по значению близка к понятию ЕСЛИ, ТО;
- тип агрегации — реализации операции объединения функций принадлежности выходной переменной;
- тип дефаззификации.

В работе были выбраны следующие типы:

- prod-импликация (умножение);
- max-агрегация (максимум);
- дефаззификация методом центра тяжести.

Далее указывается диапазон изменения переменных и значения переменных и параметры функций принадлежности (Рисунок 10–Рисунок 12).

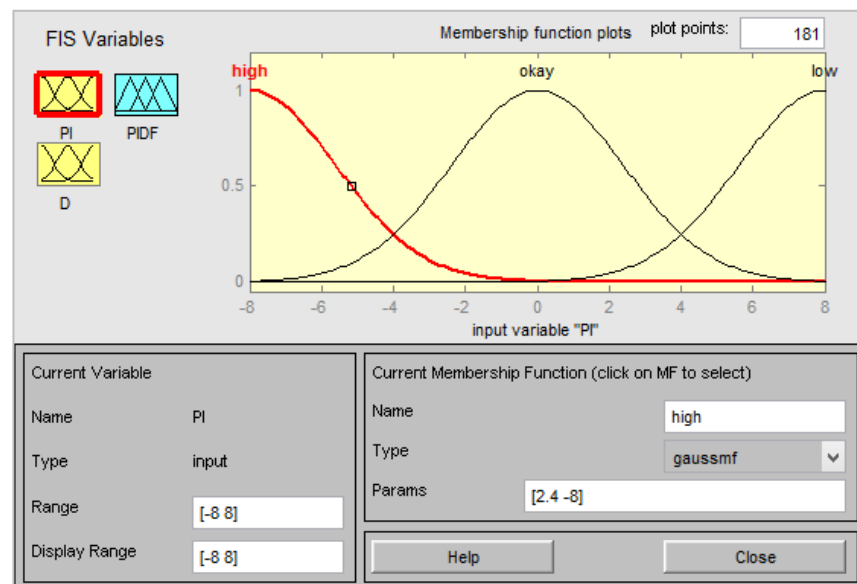


Рисунок 10 – Параметры функции принадлежности входной переменной «PI»

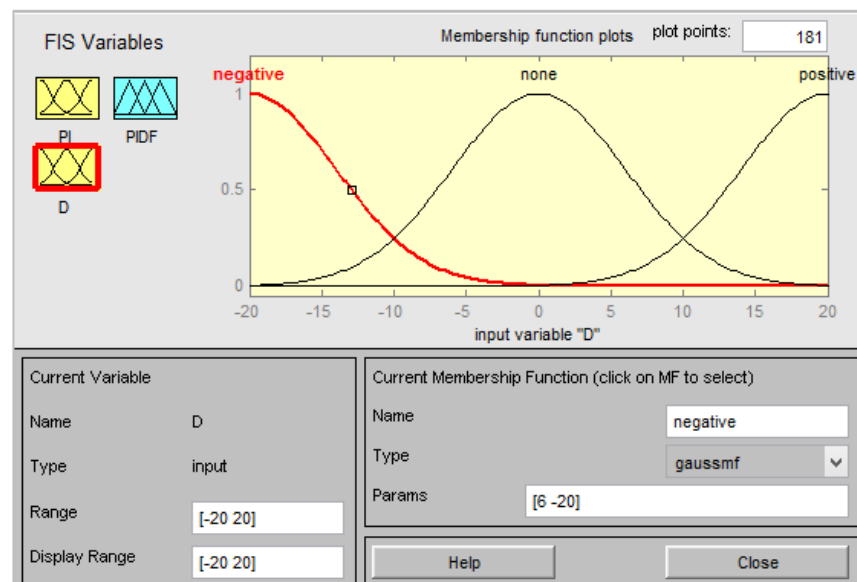


Рисунок 11 – Параметры функции принадлежности входной переменной «D»

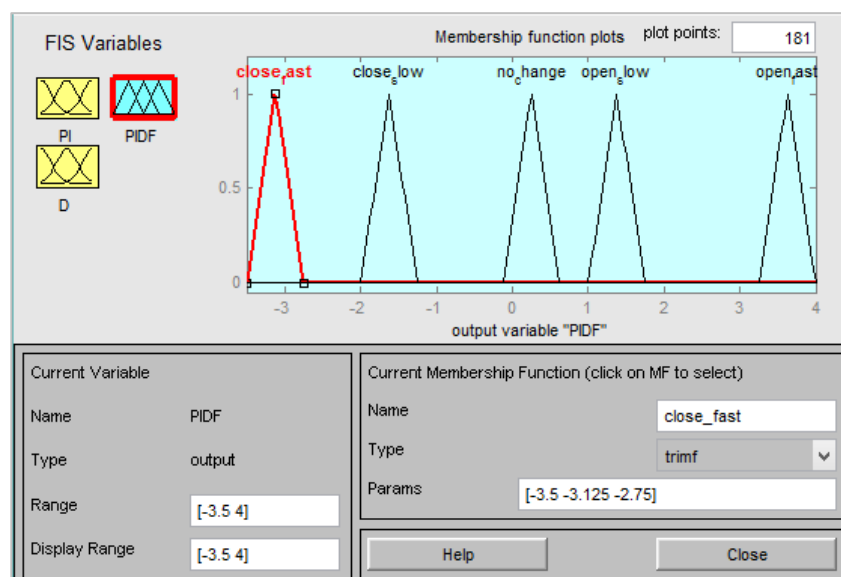


Рисунок 12 – Параметры функции принадлежности выходной переменной «PIDF»

Редактор базы знаний открывается двойным щелчком на блоке «PIDF» (рисунок 13).

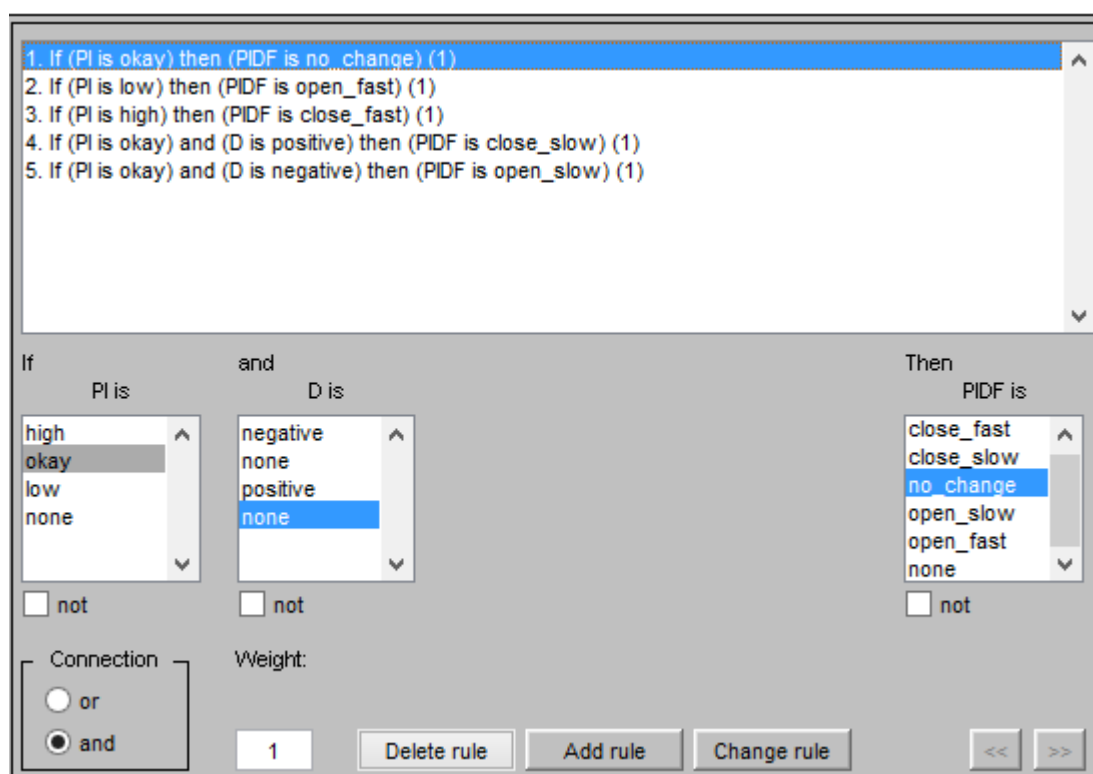


Рисунок 13 – Редактор базы знаний

Для разработки модели было составлено 5 правил. Переменная PI выступает в роли показателя уровня жидкости в баке, переменная D – в роли

показателя скорости, выходная переменная PIDF выступает в роли показателя положения золотника распределителя.

На основе данных правил составляется имитационная модель регулятора и проводятся эксперименты.

5 Разработка имитационной схемы управления скоростью

5.1 Разработка модели гидравлической трансмиссии

Для разработки имитационной модели использовался пакет прикладных программ Matlab и библиотеки SimMechanics, SimHydraulics. Для разработки нечеткого регулятора использовалась библиотека Fuzzy Logic Toolbox.

Основные блоки, использованные для моделирования, приведены на рисунках (Рисунок 14-Рисунок 17).

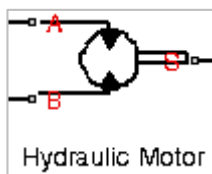


Рисунок 14 – Блок, имитирующий работу реального гидравлического мотора



Рисунок 15 – Блок, имитирующий работу гидравлического насоса

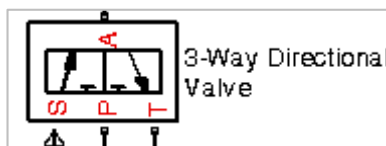


Рисунок 16 – Блок, имитирующий работу 3-х позиционного гидрораспределителя

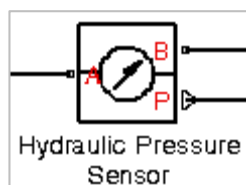


Рисунок 17 – Блок, имитирующий работу датчика давления

После выполнения моделирования вносим параметры оборудования из расчетов, приведенных в приложении «А». Имитационная схема приведена в приложении Б.

В имитационной модели использованы два типа регулятора: цифровой и нечеткий ПИД-регулятор.

Цифровой регулятор работает на основе рассчитанных коэффициентов. На вход цифрового регулятора поступает ошибка регулирования.

Нечеткий регулятор работает на основе составленной базы знаний и передаточной функции объекта управления.

Регуляторы объединены в подсистемы SubsystemControl (цифровой регулятор) и Subsystem (нечеткий регулятор). Показания снимаются с осциллографа Scope.

5.2 Разработка имитационной модели аналогового регулятора

Модель аналогового ПИД-регулятора изображена на рисунке (Рисунок 18):

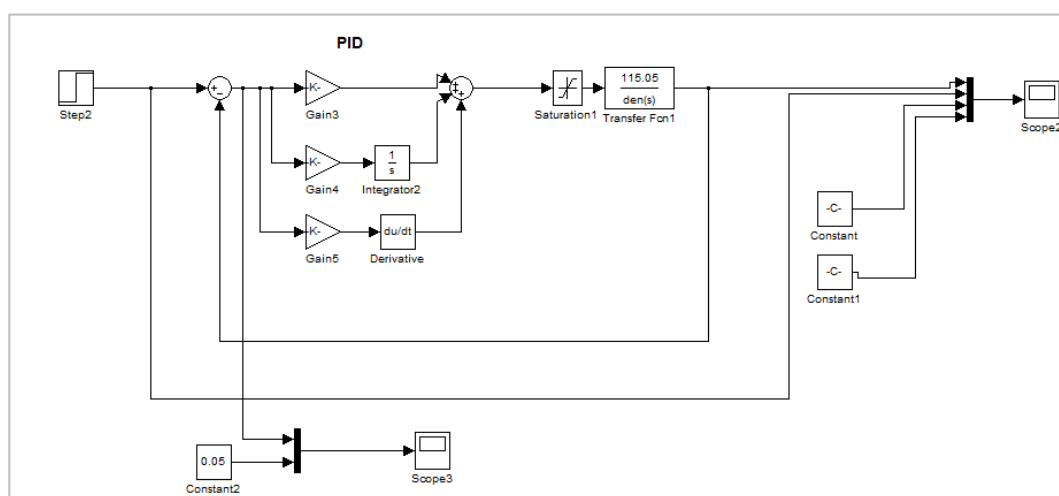


Рисунок 18 – Имитационная модель аналогового ПИД-регулятора

Параметры ПИД-регулятора $K_P = 1.756, K_I = 0.723, K_D = 0.41$

График переходного процесса представлен на рисунке (рисунок 19):

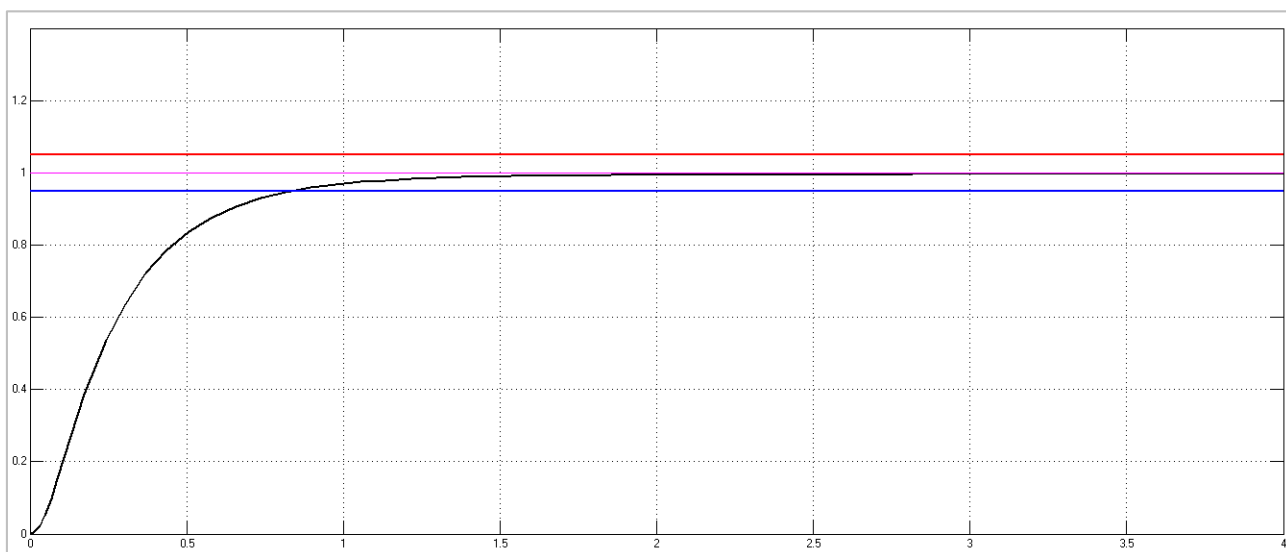


Рисунок 19 – График переходного процесса аналогового ПИД-регулятора

Время перехода в 5%-ю зону составляет около 0,8с, перерегулирование отсутствует.

5.3 Разработка имитационной модели цифрового регулятора

Имитационная модель [16] цифрового ПИД-регулятора представлена на рисунке (Рисунок 20):

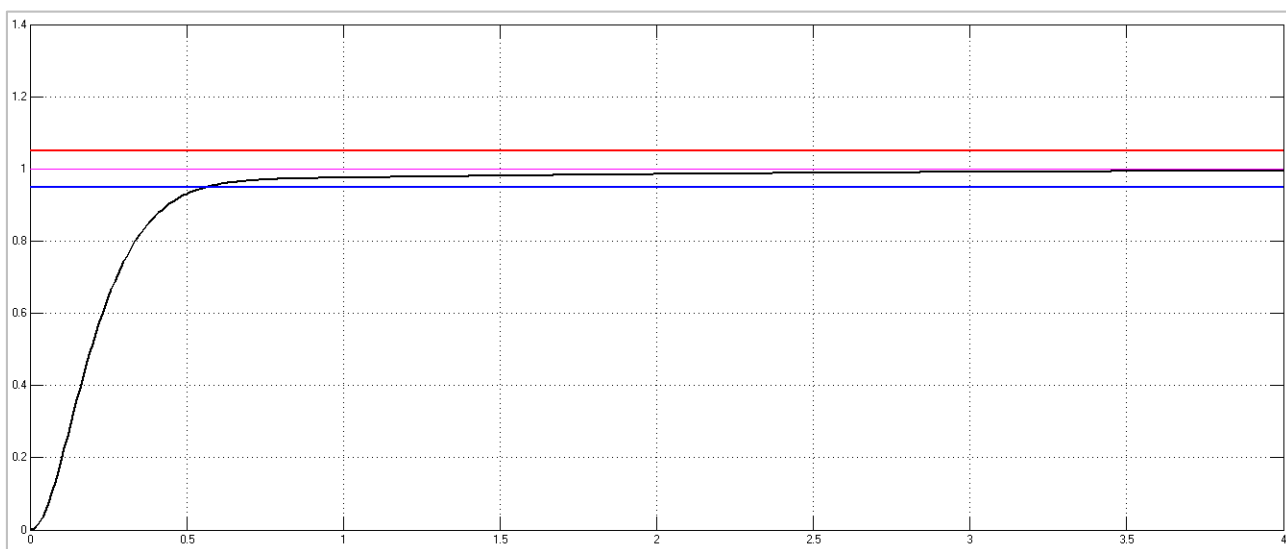


Рисунок 20 – График переходного процесса аналогового ПИД-регулятора

Параметры регулятора:

Параметры ПИД-регулятора $T = 0,005с, K_P = 125,641, K_I = 248,634, K_D = 123$.

Время перехода [17] в 5%-ю зону составляет около 0,6с, перерегулирование отсутствует.

5.4 Разработка имитационной модели нечеткого регулятора

Имитационная модель нечеткого регулятора представлена на рисунке (рисунок 21) [18]. Для сохранения постоянного шага моделирования и исключения перерегулирования на входе добавляются блоки Transfer Fcn. Нечеткий регулятор заключен в блоке Subsystem.

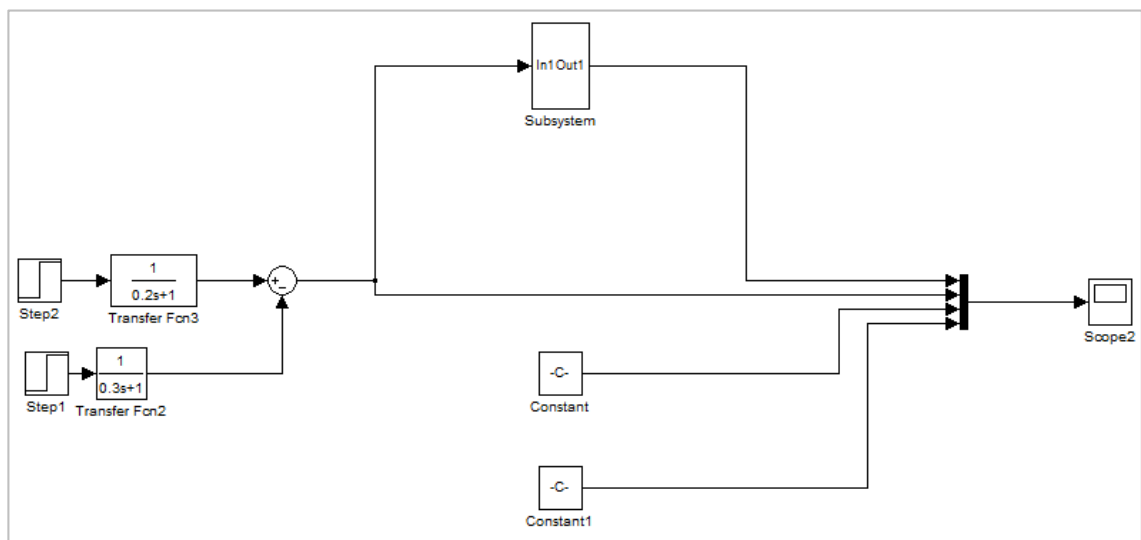


Рисунок 21 – Имитационная модель нечеткого ПИД-регулятора

Имитационная модель нечеткого ПИД-регулятора получается путем добавления в модель с аналоговым регулятором блока нечеткой логики (Рисунок 22).

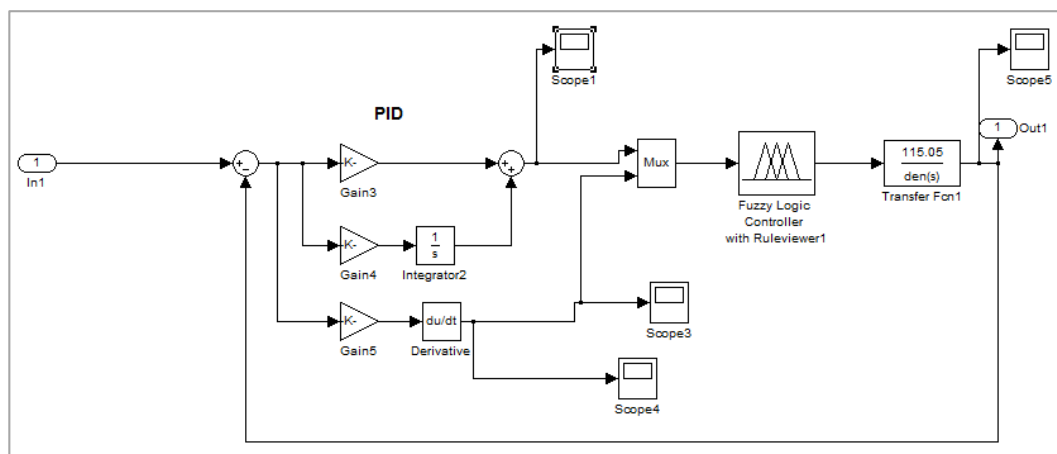


Рисунок 22 – Подсистема «Subsystem» с нечетким регулятором

Fuzzy Logic Controller – блок, имитирующий работу блока нечеткой логики [18]. В параметрах блока указывается имя файла, в котором заданы нечеткие правила (Рисунок 23).

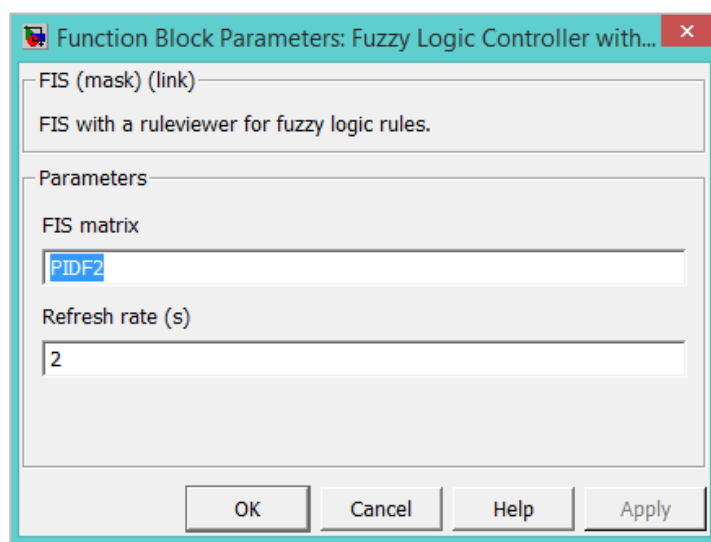


Рисунок 23 – Свойства блока Fuzzy Controller

Перед началом моделирования необходимо добавить правила в рабочую область Matlab. Для этого необходимо открыть окно редактора правил. В меню выбрать «File → Export → To Workspace». Далее нужно указать имя экспортируемого файла и подтвердить экспорт. При этом в рабочей области появится файл с заданным именем [19].

График переходного процесса регулятора представлен на рисунке (рисунок 24).

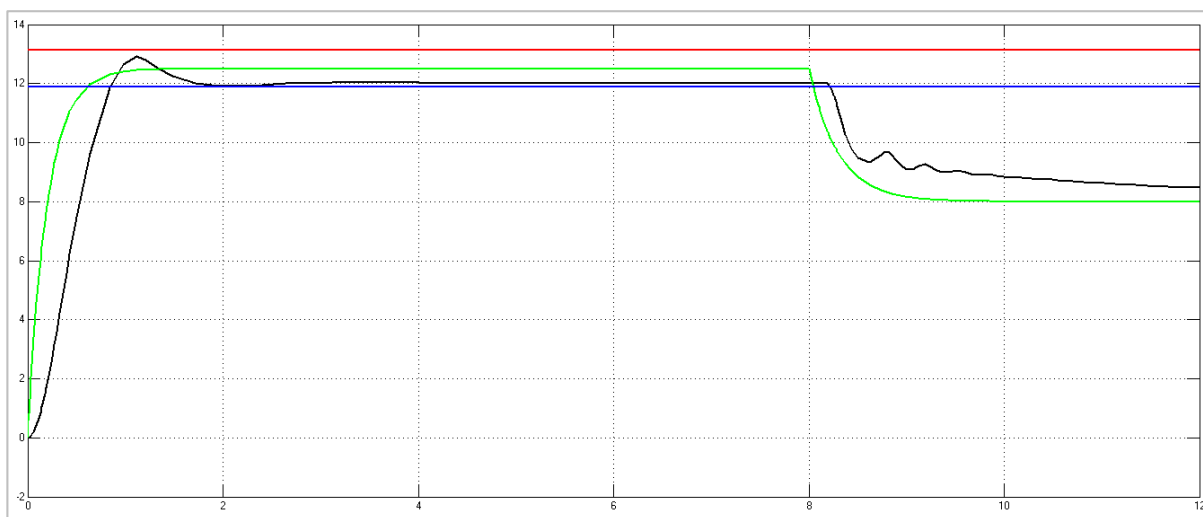


Рисунок 24 – График переходного процесса нечеткого ПИД-регулятора

На графике присутствует перерегулирование, вычисляемое по формуле:

$$y = \frac{Y_{max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} \cdot 100\% = \frac{12,5 - 12}{12} \cdot 100\% = 4,2\%$$

Перерегулирование не превышает допустимой нормы в 5%.

6 Компьютерное имитационное моделирование в среде Matlab&Simulink

Используя разработанные модели цифрового и нечеткого ПИД-регулятора, проведем компьютерное имитационное моделирование процесса регулирования скоростью движения асфальтоукладчика [20].

Составим два типа правил с разными значениями функции принадлежности выходной переменной. Параметры выходной переменной представлены на рисунках (рисунок 25–рисунок 26).

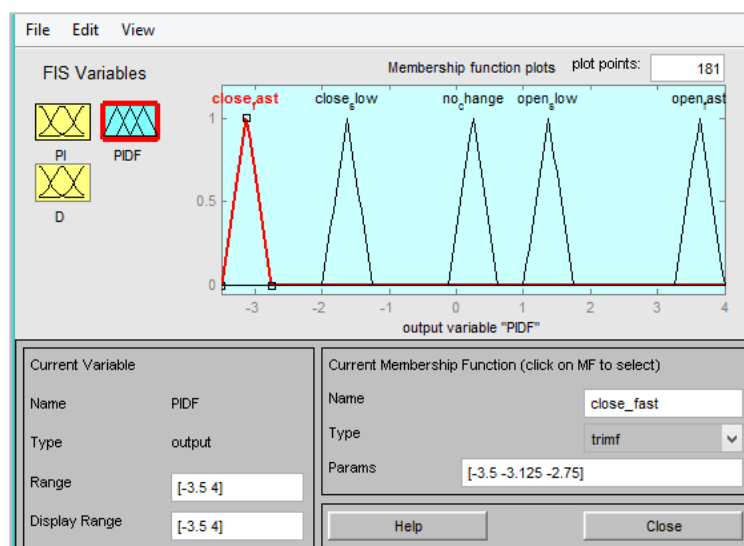


Рисунок 25 – Структура базы знаний с непересекающимися термами выходной переменной FIS2

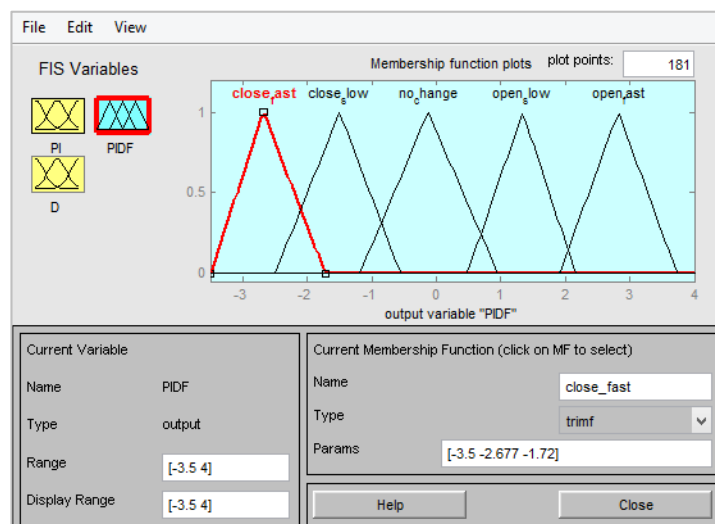


Рисунок 26 – Структура базы знаний с пересекающимися термами выходной переменной FIS21

Графики изменения скорости представлены на рисунках (рисунок 27–рисунок 28).

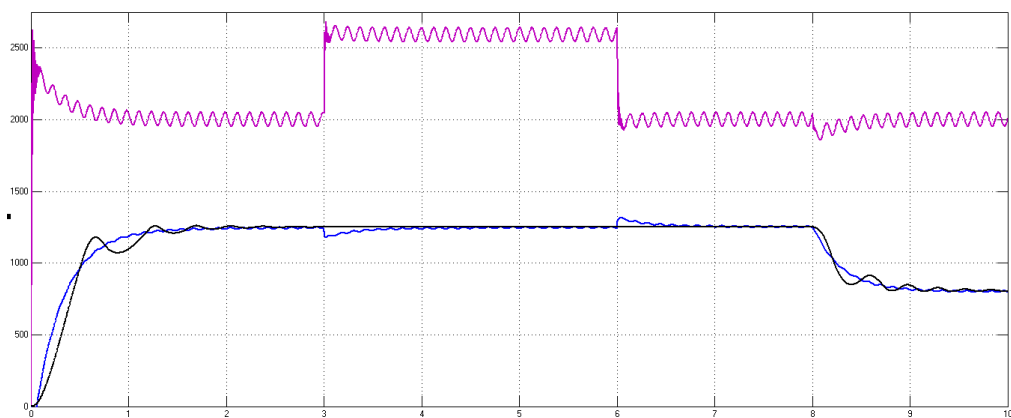


Рисунок 27 – График изменения скорости с правилами FIS2

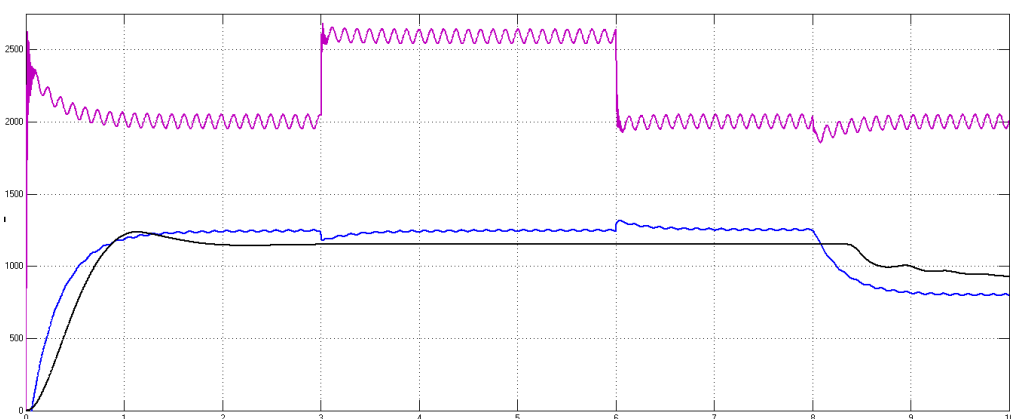


Рисунок 28 – График изменения скорости с правилами FIS21

Фиолетовым цветом (верхний график) показано изменение момента инерции системы. График изменения скорости относительно изменения момента с аналоговым ПИД-регулятором показан на графике синей линией, черной – показана отработка скорости по составленным правилам.

На графиках видно, что при увеличении диапазона изменения выходной функции меняется график изменения скорости асфальтоукладчика. При этом снизилось перерегулирование, практически устранились пульсации скорости. Показатели системы с нечетким регулятором намного лучше показателей отработки системы с цифровым ПИД-регулятором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской работы проведен анализ технологии процесса строительства асфальтобетонного покрытия.

В магистерской работе разработана имитационная модель САУ скоростью асфальтоукладчика с обратной связью и цифровым ПИД-регулятором, это помогло разработать систему управления скоростью движения асфальтоукладчика, а именно получение математической модели объекта управления в терминах пространства переменных состояния, определение передаточной функции объекта при управлении скоростью, оценка динамических характеристик объекта управления.

Далее был синтезирован нечеткий ПИД-регулятор и построена имитационная схема объекта с нечетким регулятором.

Далее была поставлена задача для управляющей системы, чтобы максимальное значение скорости по отношению к установившемуся значению в переходных режимах не превышало 8% во всем диапазоне регулирования. Время переходного процесса при отработке задания по скорости 1 рад/с не превышало 1 с.

Данные модели, с точки зрения среды MATLAB, можно считать адекватными, так как параметры по результатам моделирования практически соответствуют реальным.

- Разработана структурная схема автоматизации процесса управления скоростью движения;
- Синтезированы параметры цифрового и нечеткого ПИД-регулятора
- Разработаны имитационные модели процесса управления с цифровым и нечетким ПИД-регулятором в среде MATLAB&Simulink (SimScape & FuzzyLogicToolbox).

В результате, разработана система управления, включающая нечеткий и цифровой ПИД-регулятор. Регулятор не искажает процессы регулирования, обеспечивает астатическое регулирование скорости в заданном диапазоне, и

практическую независимость изменения скорости от основных возмущающих воздействий.

В ходе подготовки магистерской диссертации были опубликованы статьи в сборниках научных конференций Сибирского Федерального Университета и Санкт-Петербургских университетов [15–19]. Также было получено свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ [20].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений — М.: Мир, 1976 — 167 с.
- 2) Угай, С. М. Проектирование асфальтоукладчиков: учеб.-метод. пособие/ С. М. Угай. – Владивосток: ДВГТУ, 2009. – 70 с.
- 3) Пермяков, В. Б. Комплексная механизация строительства: учеб. для вузов / В.Б. Пермяков. - Москва: Высш. шк., 2005. - 383 с.
- 4) Ищенко, И.С. Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий: учеб. пособие/ И. С. Ищенко, Т. Н.Калашникова, Д. А. Семенов. - Москва: Лир-Лрт, 2001. — 176 с.
- 5) Карнаухов, Н. Ф. Электромеханические и мехатронные системы: учеб. пособие/ Н. Ф. Карнаухов. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. – 320 с.
- 6) Каверзин, С. В. Курсовое и дипломное проектирование по гидроприводу самоходных машин: учеб. пособие/ С. В. Каверзин – Красноярск: Офсет, 1997. – 384 с.
- 7) Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью/ Ч. Филлипс, Р. Харбор. – Москва: Недра, 1990. – 416с.
- 8) Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления/ Г. Олссон, Д. Пиани. – Санкт-Петербург: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
- 9) Лукас, В. А. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В. А. Лукас. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: Недра, 1990. – 416 с.
- 10) Данилов, А.И. Компьютерный практикум по курсу «Теория управления». Simulink-моделирование в среде MATLAB: учеб. пособие/ И. И. Данилов; под ред. А. Э. София. - Москва: МГУИЭ, 2002.- 128 с.
- 11) Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст] / А. В. Леоненков. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. - *719 с. . - Библиогр.: с. 717-719.

- 12) Джонс, М. Программирование искусственного интеллекта в приложениях [Текст] : пер. с англ. / М. Т. Джонс. - Москва : ДМК, 2004. - 311 с. - Предм. указ.: с. 308-311
- 13) Редько, В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект [Текст] : модели и концепции эволюционной кибернетики / В. Г. Редько ; предисл. Г. Г. Малинецкий. - 7-е изд. - Москва : URSS, 2011. - 220 с. : ил. - (Синергетика: от прошлого к будущему). - Библиогр.: с. 213-217.
- 14) Новак, В. Математические принципы нечеткой логики [Текст] = Mathematical Principles of Fuzzy Logic : перевод с английского / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкорж ; под ред. А. Н. Аверкин. - Москва : Физматлит [Физико-математическая литература], 2006. - 347 с. - Список лит.: с.335-343; Предм. указ.: с.344-347.
- 15) Зуйкова Н. Н. Автоматизация управления движением асфальтоукладчика [Электронный ресурс]/ Зуйкова Н. Н. // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края / отв. ред. О.А. Краев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2014. – Режим доступа: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s47/s47_015.pdf.
- 16) Зуйкова, Н.Н. Модель цифрового регулятора системы управления скоростью движения асфальтоукладчика / Н.Н. Зуйкова // Проспект Свободный-2015: материалы науч. конф., посвященной 70-летию Великой Победы (15–25 апреля 2015 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. — Электрон. дан. — Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2015. — Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2015/>.
- 17) Зуйкова, Н.Н. Моделирование цифрового регулятора системы управления скоростью асфальтоукладчика / Н.Н. Зуйкова, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура // Неделя науки СПбПУ : материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и

транспорта СПбПУ. Часть 1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 344 с.

- 18) Зуйкова, Н.Н. Применение нечеткого регулятора в управлении скоростью движения асфальтоукладчика/ Н.Н. Зуйкова // Молодежь и наука: проспект Свободный 2016: материалы науч. конф., посвященной Году образования в Содружестве Независимых Государств (15–25 апреля 2016 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. – Электрон. дан. – Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2016.
- 19) Зуйкова, Н.Н. Система управления скоростью движения асфальтоукладчика с нечетким регулятором/ Н.Н. Зуйкова // XXIX – Международная научная конференция Математические методы в технике и технологиях ММТТ-29/ - Санкт-Петербург.: СпбГТИ, 2016.
- 20) Имитационная модель цифровой системы управления скоростью движения асфальтоукладчика асфальтоукладчика/ Н.Н. Зуйкова // Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611927 от 10.02.2016 г

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчеты

Вес с загруженной камерой бункера 20 тонн

Делаем вывод что на одно колесо приходится вес равный 5 тонн

$KPD := 0.9$ КПД гидросистемы 0.9

$K_{sc} := 0.8$ Коэффициенты сцепления движителей 0.8

$V := 4 \frac{m}{min}$ Переводим значение скорости из метров в минуту в метры в секунду

$$V = 0.067 \frac{m}{s}$$

$R := 0.65m$ Радиус ведущего колеса

$\omega := \frac{V}{R} = 0.103 \frac{1}{s}$ угловая скорость колеса

$m_a := 5000kg$

$$g = 9.807 \frac{m}{s^2}$$

$G := m_a \cdot g = 4.903 \times 10^4 N$

$K_{sc} = 0.8$

$m_a = 5 \times 10^3 kg$ $R = 0.65m$

$M_c := K_{sc} \cdot G \cdot \frac{R}{2} = 1.275 \times 10^4 J$ Момент нагрузки (сопротивления)

Определение момента инерции

$m_k := 200kg$

$R = 0.65m$

$J_k := m_k \cdot R^2 = 84.5 m^2 \cdot kg$ Момент инерции на оси колеса

значением веса взят вес ведущего колеса

$N_k := M_c \cdot 1.2 \cdot \frac{\omega}{0.9} = 1.743 \times 10^3 W$ Мощность на оси колеса

Передаточное отношение механической передачи

$$\omega_m := 120 \frac{rev}{min} = 12.566 \frac{1}{s}$$

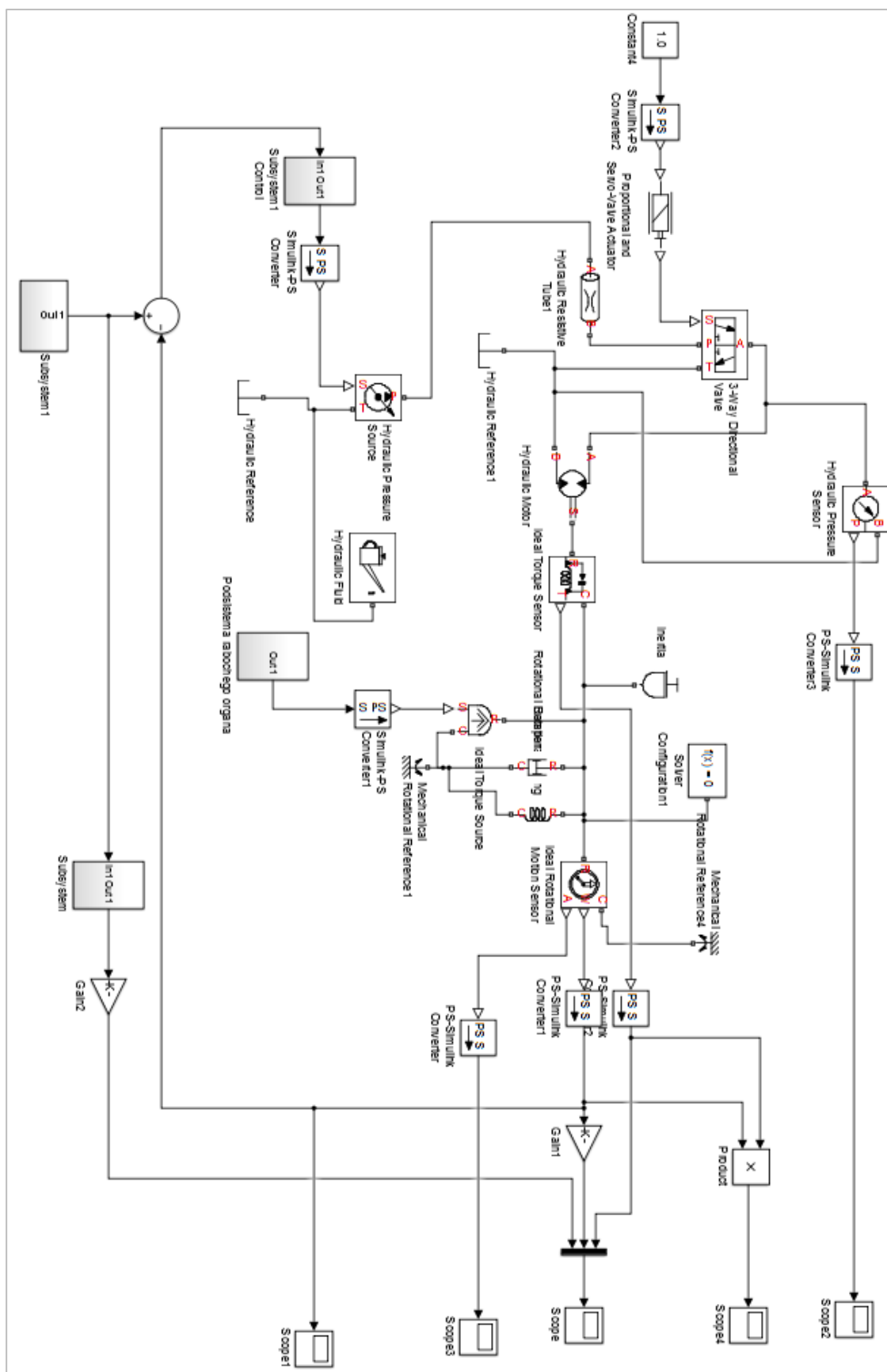
$$i := \frac{\omega_m}{\omega} = 122.522$$

$$J_m := \frac{J_k}{i} = 0.69 m^2 \cdot kg$$

$$N_m := M_m \cdot \omega_m = 1.453 \times 10^3 W$$

Момент
инерции на валу ГМ

Имитационная модель объекта управления



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Публикации

Нечеткий регулятор в управлении скоростью движения асфальтоукладчика

Дорожное строительство состоит из технологических процессов, требующих больших материальных затрат и трудовых ресурсов. Внедрение комплексной механизации и автоматизации производственных процессов приводит к снижению этих затрат. Актуальной задачей является совершенствование управления работой асфальтоукладчика.

В рамках систем управления широкое распространение получили нечеткие логические регуляторы (НЛР). Регуляторы, построенные на базе нечеткой логики, в ряде случаев способны обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими регуляторами (П-, И-, ПД-, ПИ-, ПИД-регуляторами).

Нечеткая логика - это система, которая обобщает классическую двужначную логику рассуждений в условиях неопределенности. Она позволяет описывать качественные, неточные понятия и наши знания об окружающем мире, а также оперировать этими знаниями с целью получения новой информации. Основная идея, используемая в системах управления с использованием нечеткой логики, заключается во введении «опыта эксперта» (человека-оператора; лица, принимающего решение) в разработку схемы, управляющей некоторым динамическим процессом. По утверждению создателя нечеткой логики Л. Заде, с ростом сложности системы постепенно падает способность человека делать точные и в то же время значащие утверждения относительно ее поведения, пока не будет достигнут порог, за которым точность и релевантность становятся взаимоисключающими характеристиками.

В системах управления с использованием нечеткой логики сложные отношения между входом и выходом динамических процессов описываются набором правил нечеткой логики, подразумевающих использование

лингвистических переменных вместо усложненной динамической модели. Применение лингвистических переменных, правил и законов нечеткой логики, а также приближенных рассуждений позволяет вносить опыт эксперта в разрабатываемую схему управления.

Использование нечеткой логики в системах управления позволяет уменьшить вмешательство оператора в процесс управления и, следовательно, позволяет разработать новые методики управления, более адаптированные к промышленной среде.

Цель научной работы: разработка нечеткого регулятора для управления скоростью движения асфальтоукладчика.

Задачи научной работы:

- анализ рабочего процесса асфальтоукладчика;
- составление структурной схемы автоматизации процесса управления скоростью движения;
- разработка математической модели процесса управления скоростью движения укладчика;
- разработка имитационной модели нечеткого регулятора в среде MATLAB&Simulink;
- формирование имитационной модели процесса управления.

Принцип работы фаззи-регулятора заключается в выполнении трёх взаимосвязанных этапов обработки информации.

Фаззификация – преобразование физических переменных в лингвистические.

Логическая обработка лингвистических переменных по заданным правилам.

Дефаззификация – получение выходных физических переменных.

Для успешной реализации этих этапов необходимо, составить правила, выбрать формы, математическое описание и определить параметры функций принадлежности.

Общая структура регулятора на основе нечеткой логики представлена на рисунке (Рисунок 29).

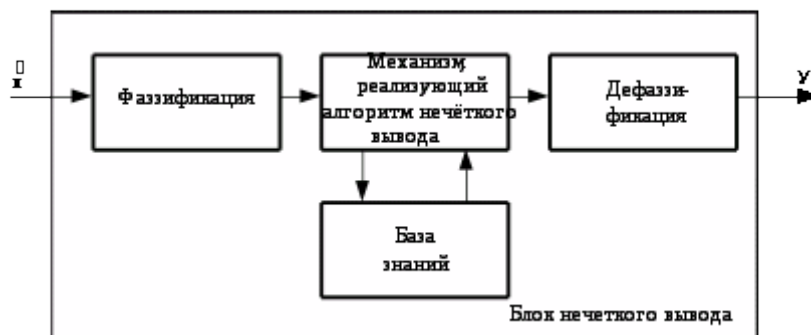


Рисунок 29 – Структура блока нечеткой логики

Для разработки имитационной модели выбран пакет прикладных программ MATLAB. Для добавления блока нечеткой логики будет использоваться Fuzzy Logic Toolbox – это пакет расширения MATLAB, содержащий инструменты для проектирования систем нечеткой логики.

Пакет позволяет создавать экспертные системы на основе нечеткой логики, проводить кластеризацию нечеткими алгоритмами, а также проектировать нечеткие нейросети.

Пакет включает графический интерфейс для интерактивного пошагового проектирования нечетких систем, функции командной строки для разработки программ, а также специальные блоки для построения систем нечеткой логики в Simulink.

Нечеткая система может быть выполнена по типу Мамдани или Сугено. Основное отличие между системами Мамдани и Сугэно заключается в разных способах задания значений выходной переменной в правилах, образующих базу знаний. В системах типа Мамдани значения выходной переменной задаются нечеткими термами, в системах типа Сугэно - как линейная комбинация входных переменных.

При помощи инструментов графического интерфейса пользователя (GUI) пакета "Fuzzy Logic Toolbox" создадим нечёткую систему типа Мамдани. Для

повышения четкости регулирования выберем треугольные функции принадлежности для входных и выходных переменных. Каждая переменная имеет симметричный диапазон изменения.

Для нечётких множеств существует общепринятая система обозначений: N– отрицательный (Negative), Z– нулевой (Zero), P– положительный(Positive); к этим обозначениям добавляют буквы S(Small –малый), M(Medium – средний), L(Large – большой). Например, NL– отрицательный большой, NM– отрицательный средний, PL–положительный большой. Количество переменных (термов) может быть любым, однако с увеличением их числа существенно возрастают требования к опыту эксперта, который должен сформулировать правила для всех комбинаций входных переменных.

В нашем случае для лингвистического описания переменных выберем девять треугольных термов (NB, NM, NS, ZN, Z, ZP, PS, PM, PB). Типы термов и диапазоны изменения задаются в окне редактора FIS (Рисунок 30).

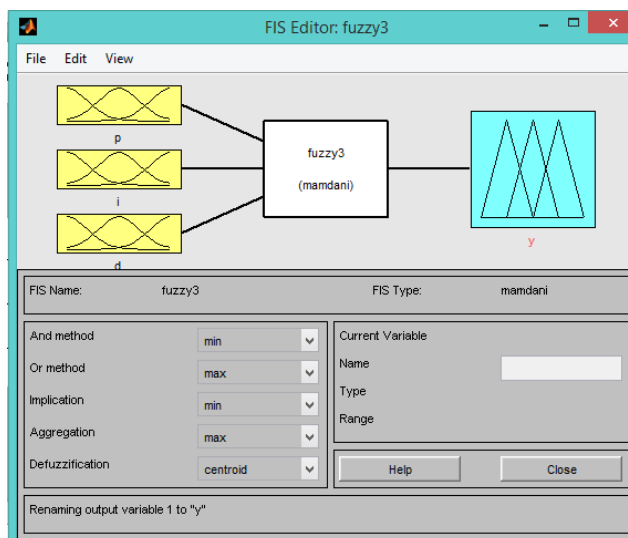


Рисунок 30 – Окно редактора Fis

После определения термов и соответствующих правил была разработана имитационная модель нечеткого ПИД-регулятора (Рисунок 31).

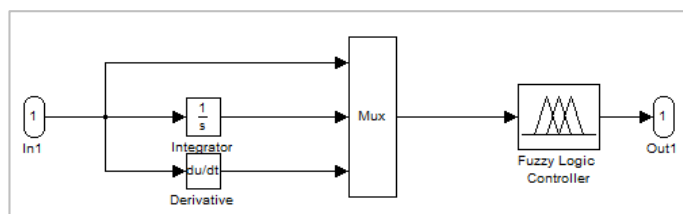


Рисунок 31 – Имитационная модель нечеткого ПИД-регулятора

Имитация работы ПИД регулятора показала, что система с нечетким регулятором значительно уменьшает общую динамическую ошибку системы. В ряде случаев системы с нечетким регулятором способны обеспечить более высокие показатели качества, нежели системы с аналоговым или цифровым регулятором.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКА С НЕЧЕТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Н.Н. Зуйкова, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура

Сибирский федеральный университет,

Россия, Красноярск, prok1@yandex.ru

Аннотация. Проведен анализ рабочего процесса асфальтоукладчика как объекта управления. Обосновано использование нечеткого управления скоростью укладчика. Разработана структурная схема модели автоматизации процесса управления скоростью асфальтоукладчика. Выполнено проектирование цифрового ПИД-регулятора и нечеткого регулятора. Разработаны имитационные модели системы управления с цифровым ПИД-регулятором и нечетким регулятором в среде MATLAB&Simulink. Выполнено компьютерное моделирование системы управления скоростью движения асфальтоукладчика в заданном диапазоне переменных. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования модели системы управления скоростью движения асфальтоукладчика с цифровым и нечетким регуляторами.

Ключевые слова: магистерская диссертация, асфальтоукладчик, гидравлический привод, регулирование скорости, искусственный интеллект, нечеткая логика, нечеткое регулирование.

CONTROL SYSTEM THE SPEED OF THE PAVER WITH FUZZY CONTROLLER

N.N. Zuykova, A.P. Prokopen, V.I. Ivanchura

Siberian Federal University

Russia, Krasnoyarsk, prok1@yandex.ru

Summary. The analysis workflow of the paver as a management object. It justifies the use of fuzzy speed control of stacker. Developed structural scheme of automation of process control the speed of the paver. Executed design of digital PID controller and fuzzy controller. Developed simulation model of control system with digital PID controller and fuzzy controller in MATLAB&Simulink. Performed computer modeling of a control system of speed of movement of the paver within a given range of variables. A comparative analysis of the results of the simulation model of the system to control the rate of movement of the paver with digital and fuzzy controllers.

Keywords: master's thesis, paver, hydraulic drive, velocity control, artificial intelligent, fuzzy logic, fuzzy regulation.

Строительство автомобильной дороги состоит из технологических процессов, выполняемых в определенной последовательности и требующих больших затрат материальных и трудовых ресурсов. Снижение этих затрат может быть достигнуто массовым внедрением в дорожное строительство комплексной механизации и автоматизации технологических процессов.

Значительные перемены произошли в технологии строительства дорог с асфальтобетонными покрытиями. Современные асфальтоукладчики позволяют обеспечивать более высокую степень предварительного уплотнения асфальтобетонных смесей. Это не только снижает затраты на их дальнейшее уплотнение, но и улучшает качество покрытия. Асфальтоукладчики оснащены автоматическими системами обеспечения продольного и поперечного профиля, блокировки привода хода и рабочих органов.

Наибольшее распространение в промышленности получили системы автоматического управления технологическими процессами с ПИД регуляторами. Особенности технологического процесса дорожного строительства являются: выполнение процесса на открытом воздухе и зависимость от факторов погоды; изменения характеристик смеси и покрытия в течении времени; изменение толщины покрытия на разных объектах; технический уровень дорожно-строительных машин; квалификация рабочих, и другие. Таким образом, асфальтоукладчик, как объект

управления, представляется как многомерная сложная техническая система (в зарубежной классификации система ММО) состоящая из подсистем со своими системами автоматического управления (САУ). Скорость движения укладчика является значимым фактором влияющим на качество асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Известно, что при строительстве дороги скорость асфальтоукладчика должна быть постоянной от 1,6 м/мин до 3 м/мин.

Теория управления в классическом и современном понимании в основном основана на идее линеаризации систем. Идея предполагает наличие точной математической модели управляемого процесса. Однако, если рассматривать объект линейным, то математическое моделирование не всегда будет отражать действительные физические свойства объекта, учитывая наличие нелинейностей. Для дорожно-строительных машин нелинейности проявляются в гидравлическом приводе основных механизмов и агрегатов. Значительный экономический эффект достигался путем внедрения ПИД-регуляторов и микропроцессорной техники.

В современных условиях при необходимости модернизировать систему управления производится замена контроллеров на более мощные. Отсутствие возможности изменений закона ПИД-управления не приносит желаемого эффекта модернизации. Также известно, что изменяя задание для контура управления, необходимо перенастроить коэффициенты ПИД-регулятора под новый режим работы. Процедура перенастройки коэффициентов в большинстве случаев не выполняется на производстве.

В магистерской диссертации рассматривается возможность модернизации системы управления скоростью движения асфальтоукладчика существующего контура с ПИД-регулятором таким образом, чтобы система имела алгоритм подстройки параметров регулятора в реальном масштабе времени. Для разработки алгоритма применяется технология искусственного интеллекта – нечеткая логика. С помощью данного метода возможно справиться с присутствующими шумами и помехами, которые представляют сложность для управления динамическими системами.

Нечёткое управление (управление на основе методов теории нечётких множеств) используется при недостаточном знании объекта управления, но наличии опыта управления им, в нелинейных системах, идентификация которых слишком трудоёмка, а также в случаях, когда по условию задачи необходимо использовать знания эксперта. Эти обстоятельства хорошо подходят для рассматриваемого объекта.

ПИД-регуляторы с нечёткой логикой в настоящее время используются в коммерческих системах для наведения телекамер при трансляции спортивных событий, в системах кондиционирования воздуха, при управлении автомобильными двигателями, для автоматического управления двигателем пылесоса и в других областях знаний.

Объектом исследования в магистерской диссертационной работе являются методы автоматизации процессом управления скоростью движения асфальтоукладчика.

Актуальность задачи определяется необходимостью улучшения системы управления скоростью укладки асфальтоукладчиком. При этом достигается снижение физической нагрузки на машиниста-оператора, улучшение качества дорожного асфальтобетонного покрытия.

Целью магистерской диссертационной работы является повышение эффективности системы автоматического управления скоростью движения асфальтоукладчика за счет применения нечеткого регулятора.

Направление исследований. Настоящее исследование ставит и решает научно-техническую задачу создания интеллектуальной системы управления скоростью движения асфальтоукладчика.

Основные задачи для достижения цели работы:

- анализ технологического процесса дорожного строительства и рабочего процесса асфальтоукладчика;
- анализ научных публикаций по теории и практике использования нечеткой логики в системах управления;
- разработка структурной схемы автоматизации процесса управления скоростью движения;
- параметрический синтез цифрового ПИД-регулятора и проектирование нечеткого регулятора;
- разработка имитационной модели рабочего процесса системы управления с ПИД-регулятором и нечетким регулятором в программной среде MATLAB&Simulink;
- моделирование и сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования системы с цифровым ПИД-регулятором и нечетким регулятором.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования и методы искусственного интеллекта.

Публикации. Основные положения магистерской диссертационной работы представлены в 4-х публикациях [1 - 4]. В процессе выполнения работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Имитационная модель системы управления скоростью движения асфальтоукладчика» [5].

Структура и объем работы. Выпускная работа состоит из 6 разделов, списка использованной литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 60 страницах, содержит 38 рисунков, 1 таблицу.

В первом разделе работы описан объект исследования. Рассмотрен технологический процесс строительства дорожных асфальтобетонных покрытий, устройство асфальтоукладчика, описан принцип работы гидравлического привода асфальтоукладчика.

Во втором разделе магистерской диссертации изложена информация о теоретических основах искусственного интеллекта, выполнен анализ методов искусственного интеллекта, основные понятия, классификация. Описаны основные положения нечеткой логики, алгоритмы нечеткого вывода Мамдани и Такаги Сугэно.

Третий раздел посвящен разработке математической модели процесса системы управления скоростью движения асфальтоукладчика. Разработана математическая модель в терминах пространства переменных состояний. Решена задача моделирования с использованием описания в виде передаточных функций.

В четвертом разделе описывается параметрический синтез цифрового ПИД-регулятора и нечеткого регулятора. Определены передаточные функции регуляторов.

В пятом разделе разработаны имитационные модели системы управления с рассматриваемыми регуляторами на основе среды MATLAB&Simulink (библиотеки SimScape и FuzzyLogicToolbox). Подробно описаны основные Simulink-блоки имитационной модели.

В шестом разделе описывается компьютерное моделирование переходного процесса модели системы управления скоростью движения асфальтоукладчика с использованием цифрового ПИД-регулятора и нечеткого регулятора. Приводится анализ результатов компьютерного моделирования сравнением динамических показателей качества систем управления.

В результате выполнения магистерской диссертационной работы проведен анализ технологии процесса строительства асфальтобетонного покрытия. Получена математическая модель объекта управления в терминах пространства переменных состояния, передаточная функция объекта при управлении скоростью. Выполнена оценка динамических характеристик переходного процесса модели объекта управления. Разработана имитационная модель цифровой САУ с обратной связью скоростью движения асфальтоукладчика. Обоснован и спроектирован нечеткий регулятор системы управления. Разработана имитационная модель системы управления объектом управления с нечетким регулятором в среде MATLAB&Simulink. С учетом сформулированного задания для управляющей системы (максимальное значение скорости по отношению к установившемуся значению в переходных режимах не превышало 8% во всем диапазоне регулирования; время переходного процесса при отработке задания по скорости 1 рад/с не превышало 1 с) полученные имитационные модели можно считать адекватными, так как параметры переходного процесса по результатам моделирования практически соответствуют реальным процессам. В результате разработана модель системы управления включающая нечеткий регулятор. Регулятор обеспечивает астатическое регулирование скорости в заданном диапазоне изменения переменных, и практическую независимость изменения скорости от основных возмущающих воздействий при движении асфальтоукладчика.

Библиографический список

1. Зуйкова Н. Н. Автоматизация управления движением асфальтоукладчика [Электронный ресурс] / Зуйкова Н. Н. // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края / отв. ред. О.А. Краев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2014. – Режим доступа: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s47/s47_015.pdf.
2. Зуйкова Н.Н. Модель цифрового регулятора системы управления скоростью движения асфальтоукладчика / Н.Н. Зуйкова // Проспект Свободный-2015: материалы науч. конф., посвященной 70-летию Великой Победы (15–25 апреля 2015 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. — Электрон. дан. — Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2015. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2015/>.
3. Зуйкова Н.Н. Моделирование цифрового регулятора системы управления скоростью асфальтоукладчика / Н.Н. Зуйкова, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура // Неделя науки СПбПУ : материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Часть 1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 344 с.
4. Зуйкова Н.Н. Применение нечеткого регулятора в управлении скоростью движения асфальтоукладчика / Н.Н. Зуйкова // Молодежь и наука: проспект Свободный 2016: материалы науч. конф., посвященной Году образования в Содружестве Независимых Государств (15–25 апреля 2016 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. – Электрон. дан. – Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2016.
5. Имитационная модель системы управления скоростью движения асфальтоукладчика / В.И. Иванчура, А.П. Прокопьев, Н.Н. Зуйкова // Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611927 от 10.02.2016 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Свидетельство о регистрации программы



Рисунок Г.1

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Слайды презентации

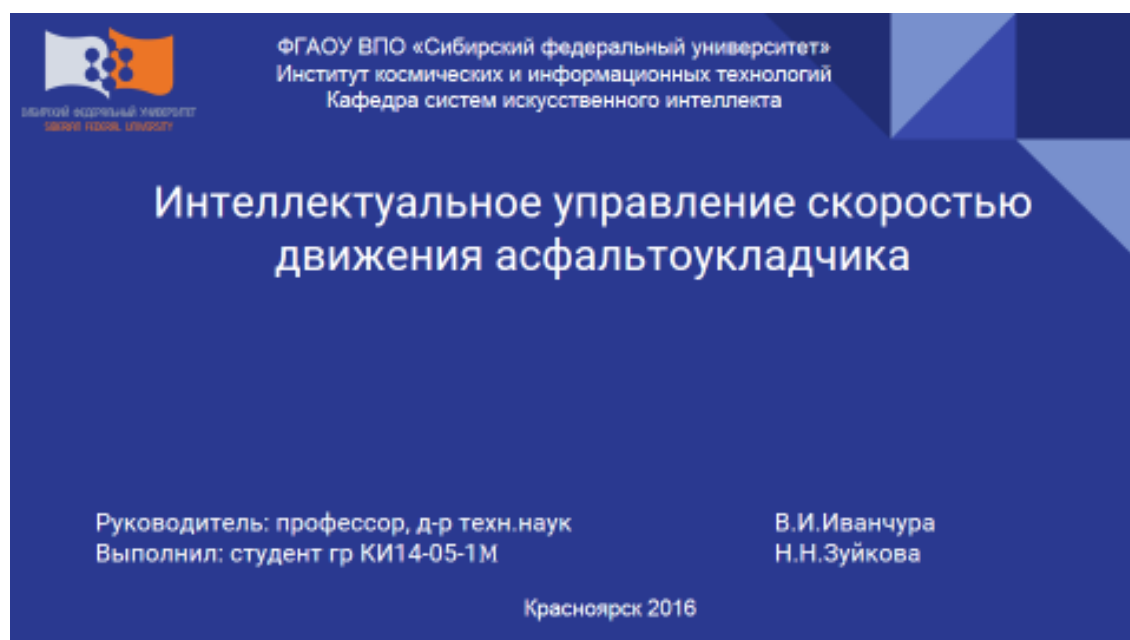


Рисунок Д.1

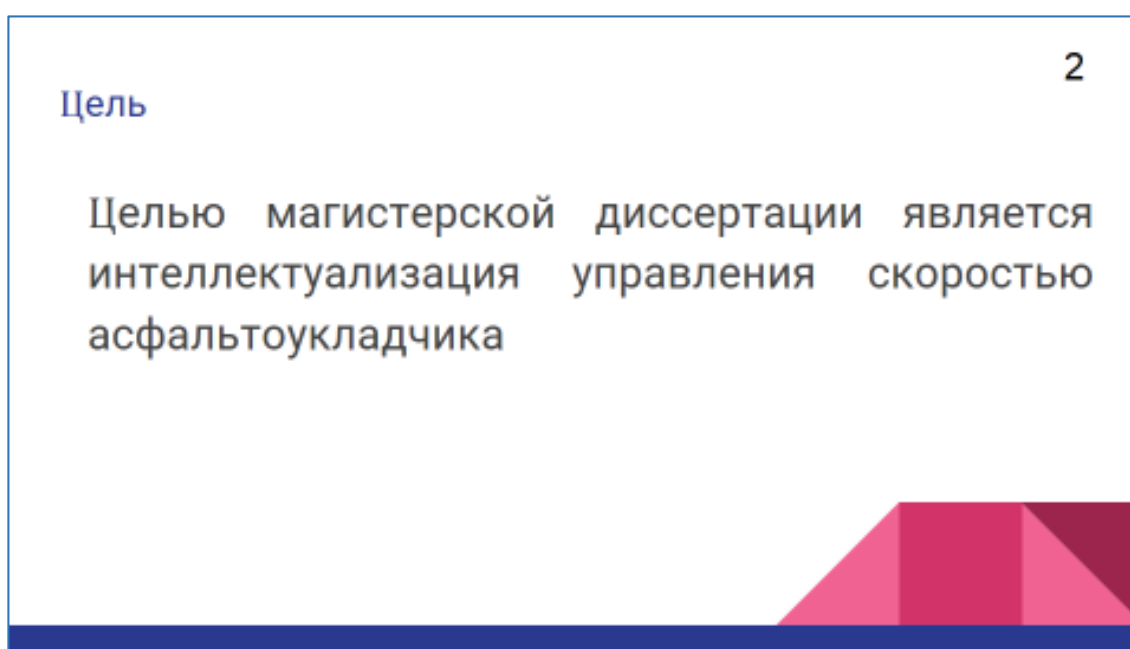


Рисунок Д.2

Задачи


- анализ рабочего процесса асфальтоукладчика;
 - составление структурной схемы автоматизации процесса управления скоростью движения;
 - Синтез аналогового и цифрового ПИД регулятора и приведение его к нечеткой форме;
 - формирование имитационной модели процесса управления в среде MATLAB&Simulink;
 - анализ результатов моделирования с цифровым и нечетким регулятором.
- 

Рисунок Д.3

Актуальность

Применение нечеткой логики в системах управления дает возможность достаточно просто заложить в систему априорную информацию об объекте.

Основным преимуществом применения нечеткой логики является близость формы записи правил к естественному языку.

Внедрение комплексной автоматизации и применения методов интеллектуального управления позволит вывести укладку дорожного полотна на более высокий уровень.




Рисунок Д.4

Нечеткий регулятор

Нечеткий регулятор - регулятор, построенный на базе нечеткой логики.

В основе работы нечеткого регулятора лежит набор правил, описываемых на основе опыта эксперта.

В условиях неопределенности заранее прописанные правила срабатывают более точно, чем человек-эксперт. Поэтому за основу разработки взят именно нечеткий регулятор.



Рисунок Д.5

Системы нечеткого вывода

- Мамдани
- Такаги-Сугено
- Цукамото



Рисунок Д.6

Структура блока нечеткого вывода Мамдани

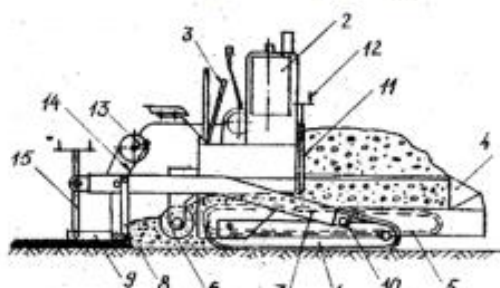
7



Рисунок Д.7

Технологическая схема асфальтоукладчика

8



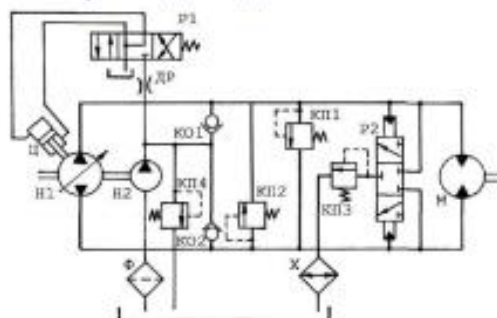
1 — самосвал, 2 — толкающий ролик, 3 — бункер, 4 — скребковый питатель, 5 — разгрузочное отверстие, 6 — винтовой конвейер, 7 — уплотняющий брус, 8 — выравнивающая плита, 9 — регулятор толщины, 10 — регулировочный винт заслонки, 11 — заслонка бункера

Рисунок 1 — Технологическая схема асфальтоукладчика

Рисунок Д.8

Гидравлический привод ходовой части

9



Н1 – регулируемый насос; Н2 – шестеренный насос; Ц – гидроцилиндр; Р1 и Р2 – гидрораспределители; ДР – дроссель; КО1 и КО2 – обратные клапаны; КП1, КП2, КП3 и КП4 – предохранительные клапаны; М – гидромотор; Мн – момент нагрузки; ω – частота вращения вала гидромотора; Ф – фильтр тонкой очистки; Х – охладитель; гидробак

Рисунок 2 – Подсистема гидропривода

Рисунок Д.9

Задание для построения системы управления движением асфальтоукладчика

10

- Перерегулирование во всем диапазоне не должно превышать $\sigma \% < 8\%$;
- Время перехода в 5%-ю зону $t \leq 1\text{с}$;
- Диапазон регулирования линейной скорости движения составляет $0.008\text{м/с} - 0.06\text{ м/с}$;
- При изменении основного возмущающего воздействия пульсация скорости составляет менее 0.4%.

Рисунок Д.10

Имитационная модель цифрового регулятора в среде Matlab Simulink 11

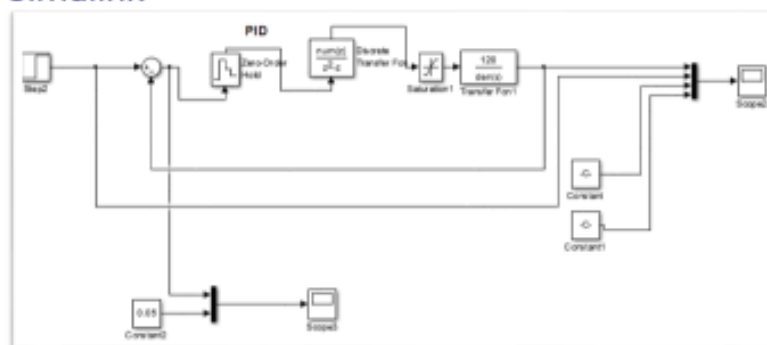


Рисунок 6 – Имитационная модель цифрового ПИД регулятора

Рисунок Д. 11

Имитационная модель нечеткого регулятора в среде Matlab Simulink 12

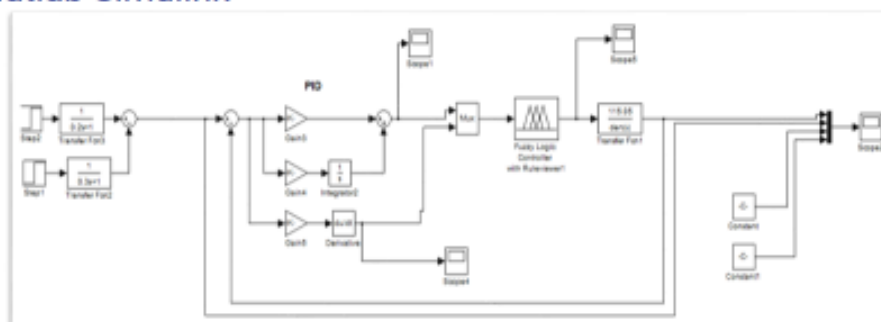


Рисунок 7 – Имитационная модель нечеткого ПИД регулятора

Рисунок Д. 12

Имитационная модель нечеткого регулятора в среде Matlab Simulink 13

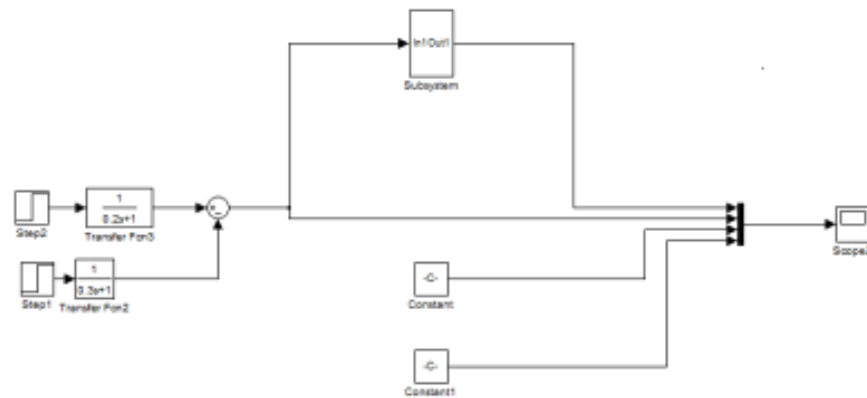


Рисунок Д. 13

Имитационная модель нечеткого регулятора в среде Matlab Simulink 14

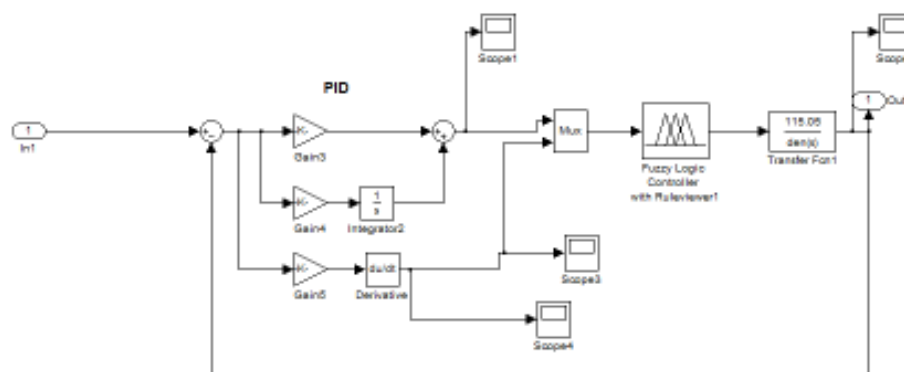


Рисунок Д. 14

Структура блока нечеткой логики для нечеткого ПИД-регулятора

15

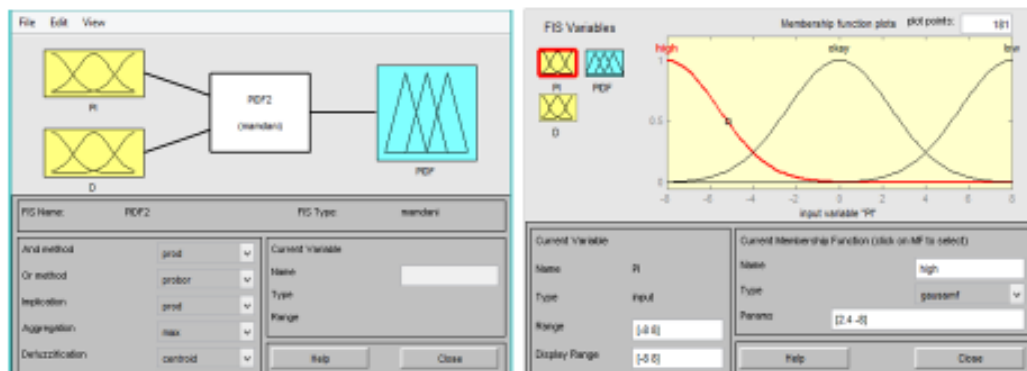


Рисунок Д. 15

Параметры функций принадлежности входных и выходных переменных

16

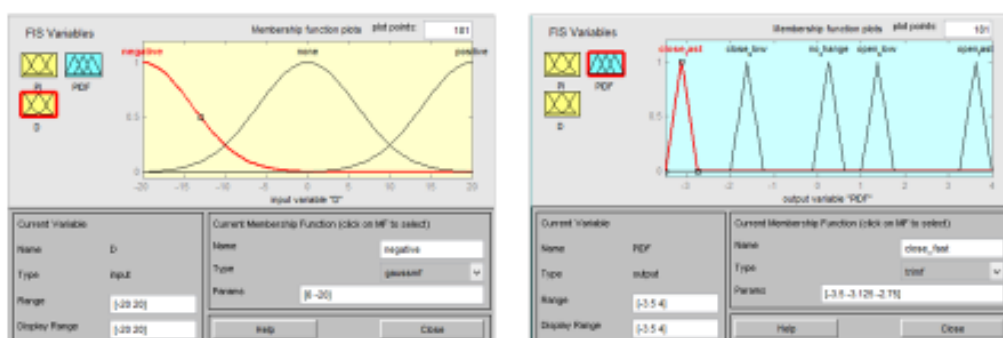


Рисунок Д. 16

Структура базы правил для нечеткого ПИД-регулятора 17

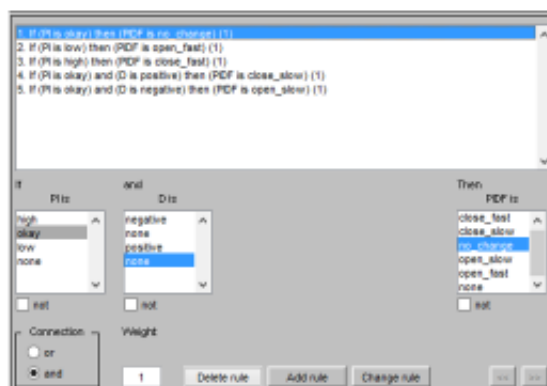


Рисунок Д. 17

График переходного процесса цифрового ПИД регулятора 18

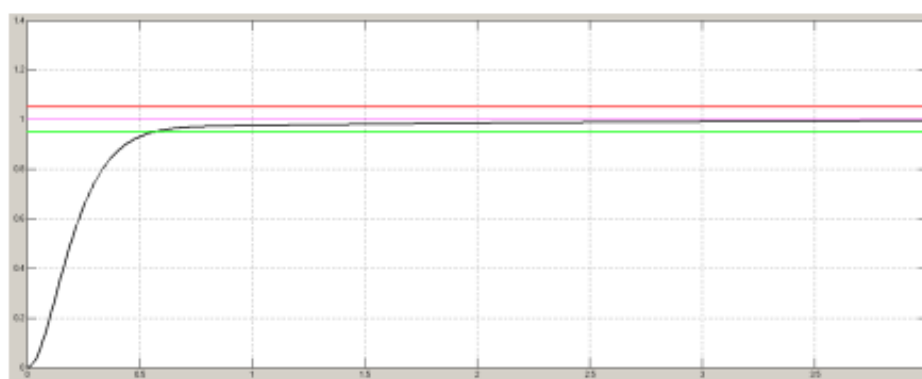


Рисунок Д. 18

График переходного процесса нечеткого ПИД регулятора

19

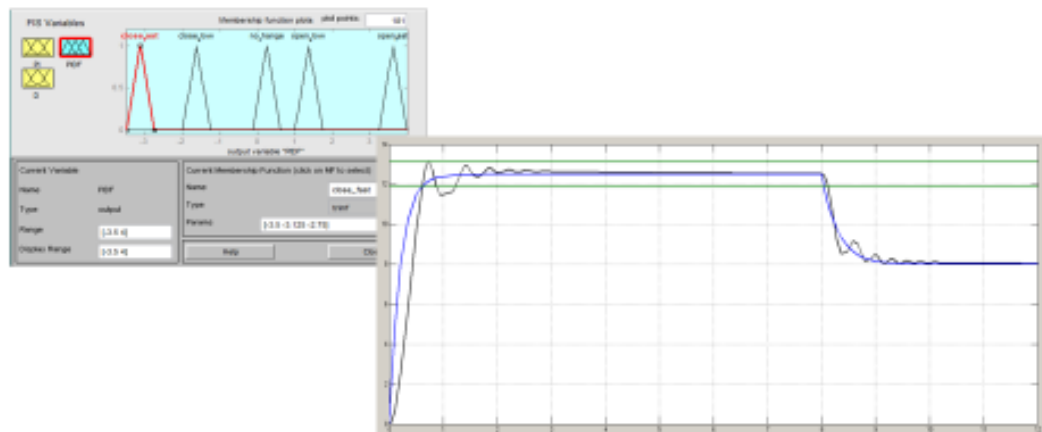


Рисунок Д. 19

График переходного процесса нечеткого ПИД регулятора

20

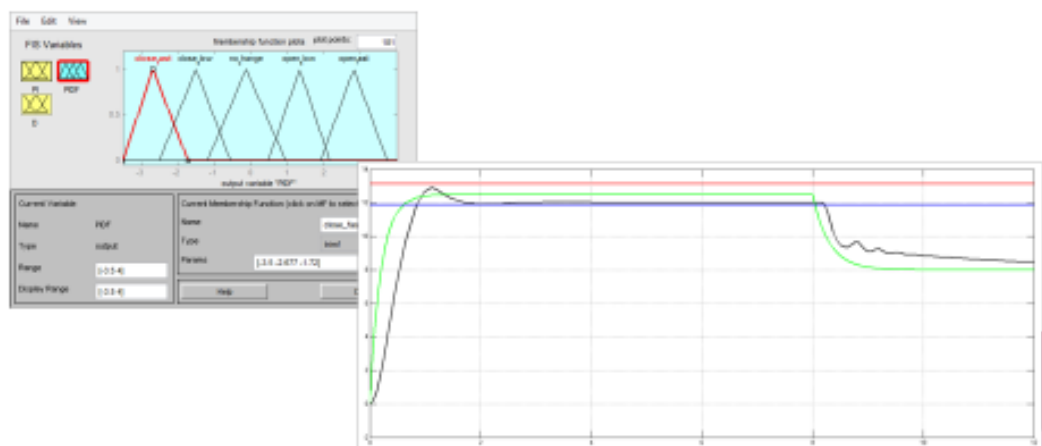


Рисунок Д. 20

Имитационная модель объекта управления в Matlab Simulink

21

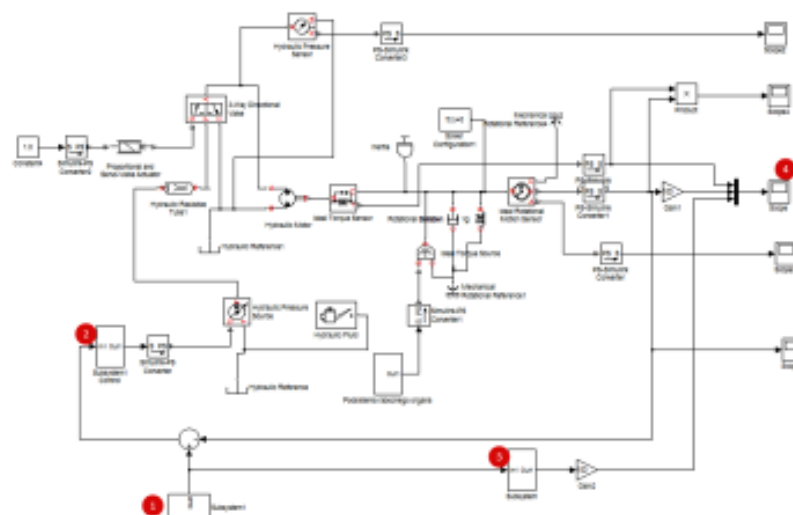


Рисунок Д. 21

График изменения скорости с полученными параметрами цифрового и нечеткого ПИД-регулятора

22

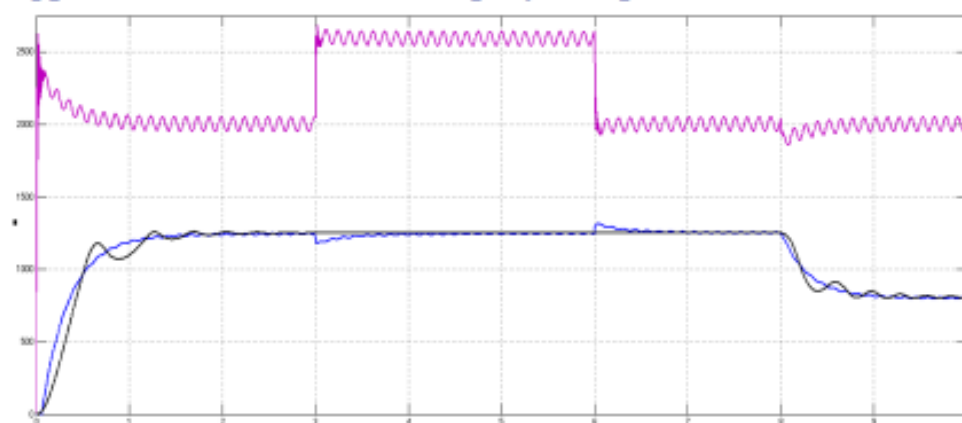


Рисунок Д. 22

График изменения скорости с полученными параметрами цифрового и нечеткого ПИД-регулятора 23

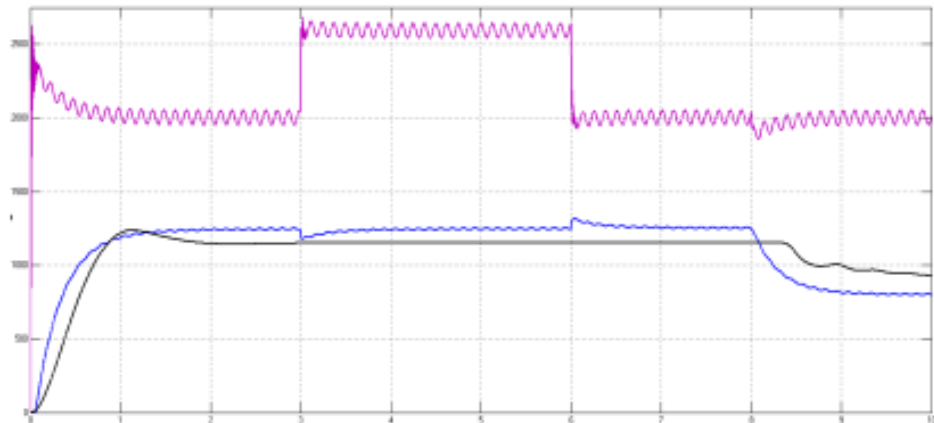


Рисунок Д. 23

Заключение

24

- Выполнен анализ рабочего процесса асфальтоукладчика ;
- Разработана структурная схема автоматизации процесса управления скоростью движения;
- Синтезированы параметры цифрового и нечеткого ПИД-регулятора
- Разработаны имитационные модели процесса управления с цифровым и нечетким ПИД-регулятором в среде MATLAB&Simulink (SimScape & F).
- Нечеткий ПИД-регулятор не искажает процессы регулирования;
- В результате, разработана система управления, включающая нечеткий ПИД-регулятор. Регулятор обеспечивает астатическое регулирование скорости в заданном диапазоне, и практическую независимость изменения скорости от основных возмущающих воздействий.

Рисунок Д. 24

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ



Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611927 «Имитационная модель цифровой системы управления скоростью движения асфальтоукладчика», В.И. Иванчура, А.П. Прокопьев, Н.Н. Зуйкова от 15.02.2016 г.

Рисунок Д. 25

Список публикаций

- Зуйкова Н. Н. Автоматизация управления движением асфальтоукладчика [Электронный ресурс] / Зуйкова Н. Н. // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края / отв. ред. О.А. Краев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2014. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s47/s473015.pdf>.
- Зуйкова, Н.Н. Модель цифрового регулятора системы управления скоростью движения асфальтоукладчика / Н.Н. Зуйкова // Проспект Свободный-2015: материалы науч. конф., посвященной 70-летию Великой Победы (15–25 апреля 2015 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. — Электрон. дан. — Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2015. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2015/>.
- Зуйкова, Н.Н. Моделирование цифрового регулятора системы управления скоростью асфальтоукладчика / Н.Н. Зуйкова, А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура // Неделя науки СПбПУ : материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Часть 1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 344 с.

Рисунок Д. 26

- Зуйкова, Н.Н. Применение нечеткого регулятора в управлении скоростью движения асфальтоукладчика/ Н.Н. Зуйкова // Молодежь и наука: проспект Свободный 2016: материалы науч. конф., посвященной Году образования в Содружестве Независимых Государств (15–25 апреля 2016 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. – Электрон. дан. – Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2016.
- Зуйкова, Н.Н. Система управления скоростью движения асфальтоукладчика с нечетким регулятором/ Н.Н. Зуйкова // XXIX – Международная научная конференция Математические методы в технике и технологиях ММТТ-29/ - Санкт-Петербург.: СПбГТИ, 2016.

Рисунок Д. 27